

GUÍA TEÓRICA PRACTICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

JESÚS DAVID ARIZA RODRÍGUEZ
RONALD ALBERTO OSPINO GÓMEZ

UNIVERSIDAD DE LA COSTA C.U.C.
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
2015

GUÍA TEÓRICA PRACTICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

JESÚS DAVID ARIZA RODRÍGUEZ
RONALD ALBERTO OSPINO GÓMEZ

Colciencias - Proyecto 616: Investigación Aplicada para Desarrollo Tecnológico e Innovación en el área de Planeamiento Energético.

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar el título de Ingeniero Eléctrico

Director académico:
ADALBERTO OSPINO
Docente Tiempo Completo

UNIVERSIDAD DE LA COSTA C.U.C.
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
2015



UNIVERSIDAD
DE LA COSTA
1970

Personería Jurídica N° 352 Abril 1971 • Barranquilla - Colombia

Barranquilla 26 de Marzo de 2015

Señores: Corporación Universidad de la Costa (CUC)
Atención: Departamento Admisiones y registros y Biblioteca.
Asunto: Recepción de proyecto de grado

El día 26 de Marzo de 2015, los estudiantes **Ronald Alberto Ospino Gómez** identificado con C.C. 72.004.882 de Barranquilla y **Jesús David Ariza Rodríguez** identificado con C.C. 1.048.289.911 de Malambo (Atlántico), hicieron entrega de los documentos y monografía de proyecto de grado junto con los anexos respectivos al programa de ingeniería eléctrica. A continuación se relaciona la información del proyecto de grado.

Título del proyecto: Guía Teórico Práctica de Energía Solar Fotovoltaica.

Decisión del jurado evaluador: Aprobado & Meritorio

Calificación: 4.6

Tutor: Ing. Adalberto Ospino Castro Ms.C.

Cotutor: Ing. Milen Balbis Morejon Ms.C.

Jurados: Ing. Hernán Hernández Herrera Ph.d.

Ing. Jorge Iván Silva Ortega Ms.C.

Se destaca la participación de los estudiantes en el Primer Encuentro de Apropiación de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en las Comunidades de la Costa Caribe Colombiana, donde socializaron sus resultados de investigación.

Atentamente,

Ing. Jorge Iván Silva Ortega Ms.C.
Líder de investigación grupo GIOPEN
Programa de ingeniería eléctrica
Docente Tiempo completo

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Barranquilla 26 de marzo de 2015

DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a Dios en primera instancia por ser creador de la vida, y a todas aquellas personas que creyeron en nosotros como también a las que no lo hicieron, a los primeros por darnos aliento para seguir adelante en nuestros tiempos difíciles y a los segundos porque al esperar nuestro fracaso, llenaban nuestros corazones de coraje y fuerza para mantenernos firmes en nuestro propósito de algún día ser profesional.

Tiene como dedicatoria especial a nuestras madres, que por su amor infinito e incondicional siempre nos apoyaron en todo momento y son el pilar de nuestras vidas.

A todas aquellas personas que aportaron con sus conocimientos a nuestro aprendizaje y nos hacen ser los profesionales de hoy.

A nuestros familiares y amistades que siempre hacen parte de nuestras vidas y nos ayudan a crecer como personas.

Por parte de Ronald Ospino Gómez, le dedico a Norma Gómez mi madre y Diana Cabrera mi Novia, por nunca dejarme de apoyar en este camino.

Por parte de Jesús Ariza Rodríguez hago total dedicatoria a Lourdes Rodríguez Valera, mi madre y mi ejemplo de vida, por darme la oportunidad de vivir para cumplir con esta meta de ser profesional.

AGRADECIMIENTOS

Desde nuestros corazones se les agradece a todas aquellas personas que aportaron su granito de arena para el desarrollo de este proyecto, ya sea en apoyo moral, económico o en conocimiento para la culminación de este trabajo de grado.

A mi compañero de tesis ya que sin su ayuda y esmero no hubiera sido Posible sacar este proyecto de grado adelante Jesús Ariza Rodríguez

A mi compañero de tesis y amigo, del cual oportunamente aprendí de sus conocimientos y le agradezco cada consejo para progresar, Ronald Ospino Gómez.

Por parte de Ronald Ospino Gómez, agradezco a mi gran amigo Juan Lacayo que siempre conté con su ayuda al igual que mi tío Miguel Arias, como siempre a mi querida Madre Norma Gómez que es mi motivación más grande y Mi hermosa novia Diana Cabrera por su cariño incondicional. A mis Hermanos Alberto y Jarkellis por creer siempre en mí y por ultimo mi Padre Alberto Ospino que es un guerrero de la vida.

Por parte de Jesús Ariza Rodríguez, agradezco a mi madre Lourdes Rodriguez por su infinito amor y fortaleza, por su formación quien me hacer ser lo que soy, a mi padre Jacobo Ariza por invitarme a emprender y a luchar por mis metas, a mi hermana María Camila a la cual amo y es mi mayor motivación para salir adelante. A todos mis familiares, a mi tío Walter Rodriguez por siempre brindarme un consejo justo. A mis pocos pero grandes amigos, agradezco a la Bonita Linda Castillo por darme voz de apoyo y creer en mí. A mis compañeros de Hijos del Señor y por último, mi mayor agradecimiento a Dios porque toda la gloria es para él.

1 Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	27
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	28
3	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	29
4	OBJETIVOS.....	30
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	30
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
5	MARCO TEÓRICO	31
5.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	31
5.2	EQUIPOS CON QUE CUENTA EL LABORATORIO	31
5.3	ESTADO DEL ARTE.....	34
5.3.1	Contexto Internacional	34
5.3.2	Contexto Nacional	34
5.3.3	Alcances.....	35
5.4	DELIMITACIÓN DEL PROYECTO	36
5.4.1	Delimitación Temporal.....	36
5.4.2	Delimitación Espacial	36
5.4.3	Delimitación de la Población	36
5.5	DEFINICIONES	36
5.5.1	La Energía Solar	36
5.5.2	La Radiación Solar	36

5.5.3	Irradiancia	36
5.5.4	Irradiación	37
5.5.5	Insolación	37
5.5.6	Célula Fotovoltaica.....	37
5.5.7	Eficiencia o rendimiento FV	37
5.5.8	Paneles Fotovoltaicos	37
5.5.9	Sistemas Fotovoltaicos Autónomos	37
5.5.10	Sistemas interconectados	38
5.5.11	Baterías.....	38
5.5.12	Estado de Carga EDC.....	38
5.5.13	Profundidad de descarga PDD	38
5.5.14	Eficiencia de Carga.....	38
5.5.15	Horas de Sol Pico” o HPS [horas].....	38
5.5.16	Angulo β	39
5.5.17	Angulo γ	39
5.5.18	Ángulo Φ	39
5.5.19	Valor Nd.....	39
5.5.20	Ángulo α	39
5.5.21	Ángulo δ	39
5.5.22	Consumo medio diario	39
5.5.23	Consumo medio diario mensual.....	39
5.5.24	Consumo total anual	39

5.5.25	Consumo medio diario anual	40
5.5.26	Días de Autonomía	40
5.5.27	Regulador	40
6	METODOLOGÍA.....	41
6.1	BASE DE LA GUIA DE LABORATORIO	41
6.2	CARACTERÍSTICAS DE LAS GUIAS DE LABORATORIO.....	42
6.2.1	Estructura.....	42
7	GUÍA TEÓRICA PRACTICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	46
	INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	47
	ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	48
	LA ENERGÍA SOLAR.....	49
	LA RADIACIÓN SOLAR	51
	IRRADIANCIA E INSOLACIÓN.....	53
	SISTEMAS SEGUIDORES	57
	SOPORTES DE SISTEMAS ACTIVOS.....	58
1	CAPÍTULO 1: ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	59
1.1	CARACTERIZACIÓN DE CÉLULA FOTOVOLTAICA CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL Y NATURAL.....	60
1.1.1	Introducción.....	60
1.1.2	Marco Teórico	62
1.1.3	Tensión de Circuito Abierto [Voc]:	63
1.1.4	Corriente de Cortocircuito [Icc]:	64
1.1.5	Eficiencia o rendimiento FV:.....	64

1.1.6	Desarrollo Experimental	65
1.1.7	Materiales para el desarrollo de la práctica	66
1.1.8	Resultado	66
1.1.9	Análisis de Resultados Conclusiones.....	67
1.2	PARÁMETROS DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	69
1.2.1	Introducción.....	69
1.2.2	Marco Teórico	69
1.2.3	Desarrollo Experimental	71
1.2.4	Materiales para el desarrollo de la práctica	74
1.2.5	Resultados	75
1.2.6	Análisis de Resultados Conclusiones.....	77
1.3	CONEXIÓN SERIE, PARALELO Y MIXTO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	78
1.3.1	Introducción.....	78
1.3.2	Marco Teórico	78
1.3.3	Desarrollo Experimental	80
1.3.4	Materiales para el desarrollo de la práctica	86
1.3.5	Resultados	87
1.3.6	Análisis de Resultados Conclusiones.....	88
2	CAPÍTULO 2: PANELES FOTOVOLTAICOS	89
2.1	MEDICIÓN DE CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	90
2.1.1	Introducción.....	90

2.1.2	Marco Teórico	91
2.1.3	Desarrollo Experimental	95
2.1.4	Materiales para el desarrollo de la práctica	97
2.1.5	Resultados	98
2.1.6	Análisis de Resultados Conclusiones.....	99
2.2	CONEXIONES ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICO	100
2.2.1	Introducción.....	100
2.2.2	Marco Teórico	100
2.2.3	Desarrollo Experimental	104
2.2.4	Materiales para el desarrollo de la práctica	109
2.2.5	Resultados	110
2.2.6	Análisis de Resultados Conclusiones.....	111
3	CAPÍTULO 3: SISTEMAS ELÉCTRICOS FOTOVOLTAICOS.....	112
3.1	SISTEMAS ELÉCTRICOS FOTOVOLTAICOS	113
3.1.1	Introducción.....	113
3.1.2	Marco Teórico	114
3.1.3	Practica Investigativa	118
3.1.4	Resultado y desarrollo Investigativo.....	118
3.2	DISEÑO BANCO DE BATERÍAS.....	119
3.2.1	Introducción.....	119
3.2.2	Marco Teórico	120
3.2.3	Desarrollo Experimental	124

3.2.4	Materiales para el desarrollo de la práctica	127
3.2.5	Resultados	127
3.2.6	Análisis de Resultados Conclusiones.....	128
3.3	PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO	129
3.3.1	Introducción.....	129
3.3.2	Marco Teórico	129
3.3.3	Practica Aplicativa	159
3.3.4	Análisis de resultados y conclusiones	159
3.4	EJEMPLOS APLICADOS	160
3.4.1	EJEMPLO 1-A.....	160
3.4.2	EJEMPLO 1-B.....	165
3.5	VEHÍCULO SOLAR	169
3.5.1	Introducción.....	169
3.5.2	Marco Teórico	169
3.5.3	Desarrollo Experimental	171
3.5.4	Resultados	174
8	CONCLUSIONES	175
9	BIBLIOGRAFÍA.....	176

Lista de Tablas

Tabla 1 Listado de Panel Solar de la CUC	32
Tabla 2 Baterías Laboratorio CUC.....	33
Tabla 3 Modulo de Lorenzo DL Solar-B.....	33
Tabla 4 Reguladores e Inversores laboratorio CUC	33
Tabla 5. Productividad Según la Orientación e Inclinación de los Paneles Fotovoltaicos.....	56
Tabla 6. Resultados Caracterización Luz Artificial.	66
Tabla 7. Resultados Caracterización Luz Natural.....	67
Tabla 8. Tecnología de Células FV.....	70
Tabla 9. Medidas del ensayo de iluminación artificial.	75
Tabla 10. Medidas del ensayo de Luz natural.	76
Tabla 11. Medidas del ensayo en serie.	87
Tabla 12. Medidas del ensayo en paralelo.	87
Tabla 13. Medidas del ensayo en circuito mixto.	87
Tabla 14. Medidas del ensayo en serie.	110
Tabla 15. Medidas del ensayo en paralelo Cargas en Serie.....	110
Tabla 16. Medidas del ensayo en paralelo Cargas en Paralelo.....	110
Tabla 17. Medidas del ensayo conexión serie-paralelo.	111
Tabla 18. Medidas del ensayo en serie.	127

Tabla 19. Medidas del ensayo en paralelo.	127
Tabla 20. Reflectancia de superficies.	139
Tabla 21. Irradiación Global diaria media mensual.	144
Tabla 22. Inclinação de Paneles por mes.	144
Tabla 23. Menor de valores máximos de inclinación.	145
Tabla 24. Radiación Global Media.	146
Tabla 25. Relación Consumo-Radiación.....	146
Tabla 26. Valor óptimo de Relación Consumo-Radiación.....	147
Tabla 27. Ejemplo Radiación Global media Mensual.....	152
Tabla 28. Corriente que debe suministrar el GFV en el punto de máxima potencia para cada inclinación	152
Tabla 29. Valor óptimo de Corriente que debe suministrar el GFV en el punto de máxima potencia para cada inclinación.	153
Tabla 30. Radiación Global Media.	154
Tabla 31. Relación Consumo-Radiación.....	154
Tabla 32. Tabla Ejemplos	160
Tabla 33. Equipos DC Ejemplo 1-A	160
Tabla 34. Equipos AC Ejemplo 1-A.....	160
Tabla 35. Estimación de Consumos DC Ejemplo 1-A.....	161
Tabla 36. Estimación de Consumos AC Ejemplo 1-A	161
Tabla 37. Radiación Global Ejemplo 1-A	162
Tabla 38. Relación Radiación-Consumo Ejemplo 1-A.	163
Tabla 39. Tabla para convertir el área o sección transversal a la designación AWG.	168

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Factor de Forma.....	63
Ecuación 2. Rendimiento.	64
Ecuación 3. Fuerza Electromotriz total generada.	80
Ecuación 4. Tensión Total.	80
Ecuación 5. Intensidad Total.....	80
Ecuación 6. Potencia Total.	81
Ecuación 7. Fuerza Electromotriz total generada.	83
Ecuación 8. Tensión Total.	83
Ecuación 9. Intensidad Total.....	83
Ecuación 10. Potencia Total.	83
Ecuación 11. Tensión Total.	85
Ecuación 12. Intensidad Total.....	85
Ecuación 13. Factor de Forma.....	93
Ecuación 14. Rendimiento.	94
Ecuación 15. Fuerza Electromotriz total generada.	104
Ecuación 16. Tensión Total.	104
Ecuación 17. Intensidad Total.....	104
Ecuación 18. Potencia Total.	104
Ecuación 19. Fuerza Electromotriz total generada.	105
Ecuación 20. Tensión Total.	105

Ecuación 21. Intensidad Total.....	106
Ecuación 22. Potencia Total.	106
Ecuación 23. Tensión Total.	107
Ecuación 24. Intensidad Total.....	107
Ecuación 25. Capacidad de la Batería e Intensidad de descarga.....	120
<i>Ecuación 26. Capacidad Total.</i>	<i>120</i>
<i>Ecuación 27. Eficiencia de Carga de batería.</i>	<i>121</i>
Ecuación 28. Tensión Total.	124
Ecuación 29. Intensidad Total.....	124
Ecuación 30. Tensión Total.	125
Ecuación 31. Intensidad Total.....	125
Ecuación 32. Posición angular de la tierra en la órbita solar.	132
Ecuación 33. Angulo de Declinación.....	133
Ecuación 34. Ecuación 34. Angulo Horario.....	134
Ecuación 35. Angulo de Puesta al Sol para hemisferio Norte.....	134
Ecuación 36. Angulo de Puesta al Sol hemisferio Sur.	134
Ecuación 37. Duración del día.	135
Ecuación 38. Referencia Hacia el Sur.	135
Ecuación 39. Referencia hacia el Norte.....	135
Ecuación 40. Radiación Global Fuera de la Atmosfera.....	136
Ecuación 41. Distancia promedio Tierra-Sol.....	137
Ecuación 42. Índice de Claridad.	137

Ecuación 43. Radiación Global diaria a un ángulo de inclinación β determinado.	138
Ecuación 44. Razón Obtenida	138
Ecuación 45. Energías Consumidas.	141
Ecuación 46. Consumo Medio Diario.....	141
Ecuación 47. Consumo Total.....	142
Ecuación 48. Consumo medio diario anual.....	142
Ecuación 49. Número Total de Paneles dimensionados para el sistema fotovoltaico.....	147
Ecuación 50. Numero de Módulos en Serie.....	148
Ecuación 51. Número de Paneles en Paralelo.....	148
Ecuación 52. Potencia de Un Módulo Generador Fotovoltáico.....	149
Ecuación 53. Consumo diario medio en periodo mensual de potencia en Amperios por hora.	150
Ecuación 54. Corriente total del generador en pico máximo de potencia.	151
Ecuación 55. Número de Módulos a Conectar en Paralelo.	151
Ecuación 56. Número de Módulos a Conectar en Serie	151
Ecuación 57. Número Total de Paneles del Sistema FV.	151
Ecuación 58.Capacidad Nominal Diaria de la Batería.	155
Ecuación 59. Capacidad Nominal Estacionaria de la Batería.	155
Ecuación 60. Ecuación 60. Corriente de entrada.....	156
Ecuación 61. Corriente de salida.	157
Ecuación 62. Corriente del Regulador.	157
Ecuación 63. Potencia del Inversor.....	158

Ecuación 64. Sección Transversal del Conductor.....	158
Ecuación 65. Número Total de Módulos Ejemplo 1-A.....	164
Ecuación 66 Sección Transversal del Conductor Ejemplo 1-B.	167
Ecuación 67. Segunda Ley de Newton.	170
Ecuación 68. Fuerza de Impulso del motor.....	170

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 Laboratorio d Fuentes Universidad de la Costa.....	32
Ilustración 2. Etapa Introducción.....	42
Ilustración 3. Etapa Marco Teórico	43
Ilustración 4. Etapa Desarrollo Experimental	44
Ilustración 5. Etapa Resultados	44
Ilustración 6. Etapa Análisis de Resultados.	45
Ilustración 7. Diagrama Unifilar del Arreglo Fotovoltaico Típico conectado a la Red.	49
Ilustración 8. Inclinación del eje de rotación de la Tierra.	50
Ilustración 9. Trayectoria del Sol debido a sus ángulos de posición proyectadas..	51
Ilustración 10. Inclinación Sugerida dependiendo el periodo.	52
Ilustración 11. Montaje optimo con orientación hacia el norte.	53
Ilustración 12. Mapa de Irradiación Solar en Colombia.....	54
Ilustración 13. Radiación sobre un Panel.....	55
Ilustración 14. Aprovechamiento de la Potencia de un sistema Pasivo.	55
Ilustración 15. . Aprovechamiento de la Potencia de un sistema Activo.	56
Ilustración 16. Panel Seguidor Solar Fotovoltaica.....	57
Ilustración 17. Célula Fotovoltaica de Silicio.	60
Ilustración 18.Composición de una Célula FV de Silicio.	61

Ilustración 19. Principio Básico de operación de tecnología fotovoltaica.	61
Ilustración 20. Curva I-V operacional de Célula FV.	62
Ilustración 21. Curva P-V operacional de célula FV.	63
Ilustración 22. Conexión para las medidas de Tensión y Corriente de la Célula. ..	64
Ilustración 23. Esquema de conexión para el ensayo realizado en el interior (iluminación artificial).	65
Ilustración 24. Esquema de conexión para el ensayo realizado en el exterior (luz natural).	65
Ilustración 25. Célula Fotovoltaica bajo Carga.	70
Ilustración 26. Esquema de conexiones. Se tomaran el valor medido de la Tensión de Circuito abierto, Voc y medición de la Corriente de Cortocircuito, Icc.	71
Ilustración 27. Conexión de las células inclinadas a un ángulo α bajo carga.	72
Ilustración 28. Diagrama de conexión para el desarrollo de la experiencia Tomando el reóstato como la carga de 0.1Ω	72
Ilustración 29. Células en conexión Serie.	78
Ilustración 30. Células en conexión Paralelo.	79
Ilustración 31. Células en conexión Mixta Serie-Paralelo.	80
Ilustración 32. Esquema de conexión en serie.	81
Ilustración 33. Esquema de conexión para desarrollo del ensayo	82
Ilustración 34. Esquema de conexión en paralelo.	84
Ilustración 35. Ensayo Sin Cargas	84
Ilustración 36. Esquema de ensayo con las Cargas.	85
Ilustración 37. Esquema de conexión mixta.	85
Ilustración 38. Esquema de conexión para desarrollo del ensayo.	86

Ilustración 39. Ejemplar de un Panel Fotovoltaico tipo cristalino.	90
Ilustración 40. Estructura general de un Panel Fotovoltaico.	91
Ilustración 41. Composición de un panel solar de células monocristalinas.....	92
Ilustración 42. Curvas I-V (izquierda) y P-V (derecha) operacional de Célula FV..	93
Ilustración 43. Medición de Tensión de Circuito Abierto.	94
Ilustración 44. Medición Corriente de Cortocircuito.....	94
Ilustración 45. Esquema de medida para ensayo de circuito abierto y cortocircuito.	95
Ilustración 46. Conexiones para el desarrollo de la experiencia.	96
Ilustración 47. Orientación hacia el norte del panel.	96
Ilustración 48. Datos del ensayo del ensayo al panel FV.....	98
Ilustración 49. Paneles en conexión Serie.	101
Ilustración 50. . Paneles en conexión Paralelo.	102
Ilustración 51. Células en conexión Mixta Serie-Paralelo.	103
Ilustración 52. Esquema de conexión en serie.....	104
Ilustración 53. Ensayo con Cargas en Serie.	105
Ilustración 54. Esquema de conexión en paralelo.....	106
Ilustración 55. Esquema de ensayo con las Cargas en paralelo (izquierda) y con cargas en serie (derecha).	107
Ilustración 56. Esquema de conexión mixta.....	108
Ilustración 57. Esquema de ensayo con las Cargas en serie-paralelo.....	108
Ilustración 58. Sistema Fotovoltaico, Componentes.	114
Ilustración 59. Esquema general de Sistemas Solares Autónomos.....	116

Ilustración 60. Esquema de Sistemas Solares Interconectados	117
Ilustración 61. Conexión Serie de las Baterías, aumenta el voltaje y la capacidad se mantiene.	122
Ilustración 62. Banco de Baterías conectado en serie.	122
Ilustración 63. Conexión paralela de las Baterías, aumenta la capacidad y la tensión se mantiene.	123
Ilustración 64. Banco de Baterías conectado en paralelo.	123
Ilustración 65. Conexión Serie-Paralelo de un Banco de Baterías.	124
Ilustración 66. Esquema de conexión en serie.	124
Ilustración 67. Ensayo con Baterías en Serie.	125
Ilustración 68. Esquema de conexión en paralelo.	126
Ilustración 69. Esquema de ensayo con Baterías en Paralelo.	126
Ilustración 70. Grafica Tensión vs. Tiempo, Control de Carga.	128
Ilustración 71. Ángulos de Recepción de Superficie	131
Ilustración 72. Posición Angular de la Tierra dentro de la órbita Solar.	132
Ilustración 73. Declinación de la Tierra.	133
Ilustración 74. Esquema del cambio de declinación con movimiento del Sol respecto al plano del Ecuador.	134
Ilustración 75. Característica V-I y P-V de un generador fotovoltaico	149
Ilustración 76. Esquema Base de un Sistema Fotovoltaico	170
Ilustración 77. Estructura Base.	171
Ilustración 78. Chasis.	172
Ilustración 79. Base de Panel Solar.	172
Ilustración 80. Motor Eléctrico.	172

Ilustración 81. Condensador de 1500 micro Faradios.....	173
Ilustración 82. Célula Solar Fotovoltaica.....	173
Ilustración 83. Prototipo de Vehículo solar.....	173
Ilustración 84. Esquema de Conexión.	174

ABREVIATURAS

C.A.: Corriente Alterna.

CC: Corriente Continua.

C.D.: Corriente Directa.

FF: Factor de forma

FV: Fotovoltaico.

GFV: Generador fotovoltaico.

HPS: Horas Pico Sol.

I_{cc}: Corriente de cortocircuito

I_M: Intensidad máxima.

MPPT: Punto de máxima potencia

P_M: Máxima potencia.

P_L: Irradiancia incidente.

SFA: Sistemas fotovoltaicos autónomos.

STC: Condiciones estándares de medida.

V_M: Valor de tensión máxima.

RESUMEN

Dentro del siguiente proyecto, se encontrará una serie de prácticas de laboratorio que forman parte de una guía específica diseñada para desarrollar competencias en manejos sobre temas de diseño y evaluación de Sistemas Fotovoltaicos, éstas guías surgen de una investigación realizada dentro el material bibliográfico con que cuenta la Universidad de la Costa CUC, de la investigación por diferentes base datos especializadas y visitas a otras universidades de la ciudad y región, dando como resultado, una manual Teórico Practico, por medio el cual el estudiante adquirirá los conocimientos pertinentes empezando desde los más básicos y a medida que desarrolle cada practica ira adquiriendo destrezas en el manejo de cada uno de los temas, para llegar al final a desarrollar y diseñar sistemas de generación con paneles fotovoltaicos.

Para llegar a esto, se tuvo en cuenta el encadenamiento de conceptos que manejaba cada uno de los autores, llevando una tendencia, también con los equipos con que cuenta el laboratorio de fuentes renovables, ya que cada una de las prácticas se utilizará los recursos de éste. Se desarrollará un estudio previo a la teoría, se realizarán mediciones prácticas y cálculos a partir de la recopilación de estos datos y se comparará con los teóricos en ciertos casos, se enseñará que hacer con los datos obtenidos y a su interpretación. Todo esto ajustándose, dentro del marco normativo nacional como la NTC 2050: 1998, Código eléctrico Colombiano., NTC 2883: 1991, Energía fotovoltaica. Módulos fotovoltaicos, NTC 4405: 1998, Eficiencia energética. Evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos y sus componentes, y cartillas dadas por la UPME (unidad de planeación Minero energética).

Palabras Clave: Energía solar (Solar Energy), Insolación (Insolation), Irradiancia (Irradiance), Paneles Solares (solar Panels), Radiación Solar (Solar Radiation).

ABTRACD

Within the next project, a series of labs that are part of a specific guide designed to develop skills in handling on issues of design and evaluation of photovoltaic systems, these guides are based on research conducted within the bibliographic material available will be University of Costa CUC, research by different base specialized data and visits to other universities in the city and region, resulting in a Theoretical Practical Manual, through which students acquire relevant knowledge starting from the most basic and as each develops anger acquiring practical skills in managing each of the issues, to reach the final to develop and design generation systems with photovoltaic panels.

To achieve this, it took into account the sequence of concepts that drove each of the authors, leading a trend, also with the equipment available to the laboratory for renewable sources because each resource practices will be used this one. A pre-study was developed theory, practical measurements and calculations are performed from the collection of this data and compared with theoretical in some cases, be taught to do with the data obtained and their interpretation. All this being adjusted within the national policy framework as NTC 2050: 1998, Colombian Electrical Code, 2883 NTC. 1991 Photovoltaics. Photovoltaic modules, NTC 4405: 1998, Energy efficiency. Evaluation of the efficiency of photovoltaic solar systems and their components, and primers provided by the UPME (Energy Mining Planning Unit).

Keywords: Solar Energy (Solar Energy), exposure (Insolation) irradiance (Irradiance), Solar Panels (Solar Panels) Solar Radiation (Solar Radiation).

Durante los últimos años el auge de las energías Renovables ha aumentado considerablemente. En particular, con la entrada en Colombia de la ley 1715 de 2014 que tiene como objeto promover el desarrollo y la utilización de las energías renovables, orientando políticas públicas, incentivando la penetración, estableciendo un marco jurídico, estimulando la inversión, la investigación y el desarrollo tecnológico; en este último punto el programa de ingeniería eléctrica de la Universidad de la Costa CUC a través de sus grupo de investigación en optimización energética (GIOPEN), en los últimos años ha venido desarrollando dentro de sus asignaturas optativas competencias en energías renovables, actividades que promueven la toma de conciencia sobre la búsqueda de un desarrollo sostenible enfocado al aumento de la producción energética en la Costa Atlántica basada en energías renovables. La educación basada un desarrollo sostenible y, en particular la educación en energías renovables a nivel universitario, debe cumplir un importante papel en la generación de nuevos profesionales dedicados a estudiar estos problemas de tipo técnicos, regulatorios, económicos, financieros, institucionales, ambientales, políticos y sociales; obteniendo competencias con perspectivas más amplias sobre el tema. Esto ha producido durante los últimos años un incremento considerable por parte de los estudiantes en la generación de proyectos de energía procedente de fuentes renovables, especialmente eólica y solar.

Como aporte de nuestra investigación se desarrolla La guía teórica practica de energía solar fotovoltaica, adaptadas de acuerdo a los equipos con que cuenta el laboratorio de. La Universidad De La Costa

Con el libro Guía de Laboratorio, los estudiantes de ingeniería eléctrica, el Diplomado y de la especialización en Fuentes Renovables, contarán con una herramienta adicional donde podrán encontrar la teoría fundamental, métodos de cálculos y ejemplos para diseños de sistemas fotovoltaicos, por otra parte las guías pondrán al estudiante en contacto directo con los equipos del laboratorio y materiales del Laboratorio.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La universidad de la Costa hoy en día cuenta con las instalaciones y los equipos para el desarrollo del laboratorio de fuentes renovables, esto con el fin de estar a la vanguardia en educación frente a estos temas, ya que es de importancia a nivel mundial, pero el material bibliográfico existente en el mercado y su biblioteca referente a guías de laboratorio para fuentes renovables, con énfasis en sistemas Fotovoltaicos son textos diseñados y con ejemplos en escenarios totalmente distinto a las de nuestra región, muchos de estos textos sus ejemplos prácticos y guías de laboratorio se presentan en zonas y entornos como España u Europa y otros textos en Norteamérica, lo cual las tablas de radiación son basados en esas regiones y al desarrollar prácticas de laboratorio con datos adquiridos en Colombia, estos diferirían con las tablas propuestas y no habría manera de corroborar con mediciones practicas

Por otra parte los textos de guías de laboratorio, asumen que todas las instituciones poseen los materiales y equipos pertinentes para desarrollar su experiencia, lo que imposibilita al no contar con esos equipos poder desarrollar ciertas prácticas lo cual dificulta el complemento académico del estudiantado para la mejora de sus conocimientos.

La Universidad de La costa ha invertido los recursos pertinentes para tener dentro de su programa académico de Ingeniería eléctrica las herramientas necesaria para la enseñanza de los principios básicos de funcionamientos y la utilización de las fuentes No convencionales de energía con el fin de volverse líder en la región y el país frente a estos temas. Por eso dentro de su plan académico se tiene entre sus asignaturas de Pregrado como electiva de Profundización Fuentes Renovables 1 y Fuentes Renovables 2, y en su portafolio de Post Grado el Diplomado y la especialización en energías renovables.

Pero ¿la Universidad de la Costa CUC cuenta con la todas las herramientas necesarias para satisfacer las competencias académicas que los estudiantes de estas asignaturas y el diplomado, el laboratorio de Fuentes Renovables?, ¿cuenta con las guías de prácticas de laboratorio para el complemento necesario de las competencias de la asignaturas?

3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto se justifica de acuerdo a la misión y visión de la universidad de la costa en su meta de ser reconocida como una institución de alta Calidad y que está a la vanguardia en todos los temas de investigación actual, también Por otra parte el gobierno a través de la nueva Ley 1715 de 2014 que promueve el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, así como al fomento de la inversión, la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias. A partir de esto, se ha creado el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, orientado a financiar los programas de eficiencia energética.

La Energía Solar Fotovoltaica en La Costa Caribe es un punto estratégico para la implementación de este tipo de sistemas de generación, como lo podemos comprobar a través del mapa solar de irradiación de Colombia suministrado a través de la página de la UPME. Por eso La Universidad De La Costa en su aporte como entidad educativa en la enseñanza y capacitación de los profesionales de nuestra región y país, desarrollo en sus instalaciones el laboratorio de energía renovable y como aporte de nuestra investigación se desarrolló las guía teórica practica de energía solar fotovoltaica, adaptadas de acuerdo a los equipos con que cuenta el laboratorio.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y constituir una guía teórico-práctica usando tecnología fotovoltaica para su desarrollo en el Laboratorio de Fuentes Renovables de Energía de la Universidad de la Costa.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar el diferente material bibliográfico respecto a guías de laboratorio para sistemas fotovoltaicos que permita generar las pautas necesarias para establecer la metodología de la guías teórico practica de energía fotovoltaica.
- Recopilar los fundamentos básicos de la conversión de energía fotovoltaica de manera que el alumno alcance el nivel de conocimientos necesario para comprender los fenómenos que tienen lugar en los sistemas solares fotovoltaicos.
- Lograr la integración entre la teoría y la práctica utilizando los equipos pertinentes del laboratorio de fuentes renovables de la universidad de la Costa.
- Desarrollar la Guía Teórico-Práctica en base a la información recopilada y adaptada a los equipos con que cuenta el laboratorio de fuentes Renovable dela Universidad de la Costa.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

A partir de la creciente demanda por el interés en la implementación de las fuentes no convencionales de energía, se han desarrollado acciones educativas continuas en el área de la enseñanza de las energías renovables, estas acciones abren a variadas líneas de trabajo sobre el diseño y la elaboración de materiales educativos en las universidades del país. Por eso La Universidad De La Costa en su aporte como entidad educativa en la enseñanza y capacitación de los profesionales de nuestra región y país, desarrollo en sus instalaciones el laboratorio de Fuentes Renovables de Energía y como aporte de investigación se desarrolla la Guía Teórica – Practica para Experiencias de Laboratorio de Fuentes Renovables: Energía Solar Fotovoltaica, adaptadas de acuerdo a los equipos con que cuenta el laboratorio, con esto, busca promover la apertura a la investigación y desarrollo de tecnología solar fotovoltaica por medio de proyectos de aulas, implementando la guía en experiencias de laboratorios con un énfasis aplicado al uso de Sistemas Fotovoltaicos.

Este proyecto a su vez hace parte del macroproyecto de Investigación aplicada al desarrollo tecnológico e innovación en el área de planeamiento energético regional, el cual está organizado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, dentro del marco del denominado Proyecto 616. Dentro de esto, la Guía Teórica – Práctica para Experiencias de Laboratorio de Fuentes Renovables su finalidad es fortalecer la capacidad investigativa, desarrollo e innovación en los grupos de investigación del país para la implementación de modelos de generación de energía eléctrica a partir de las diferentes tecnologías de generación complementarias, en la que se tiene como referente la tecnología solar fotovoltaica.

5.2 EQUIPOS CON QUE CUENTA EL LABORATORIO

- 8: Paneles solares
- 1: Módulo de Lorenzo con 8 equipos.
- 3: Reguladores de Voltaje
- 1: Inversor
- 6: Baterías
- 14: Kits de energía renovable Horizon

Ilustración 1 Laboratorio d Fuentes Universidad de la Costa



Fuente: Propia

Tabla 1 Listado de Panel Solar de la CUC

Paneles Solares					
N°	Serie	Equipo	Desig.	Modelo	P
1	092EGH01166	Panel Solar	De Lorenzo 209	KD50SE-1P	50/35 W
2	092EGH0170	Panel Solar	De Lorenzo 209	KD50SE-1P	50/35 W
3	101MYM1084	Panel Solar	Kyocera	KD135SX-QPU	135/95 W
4	101MYM1452	Panel Solar	Kyocera	KD135SX-QPU	135/95 W
5	112MYM4153	Panel Solar	Kyocera	KD135SX-QPU	135/95 W
6	10YMYM1014	Panel Solar	Kyocera	KD135SX-QPU	135/95 W
7	10YMYM1015	Panel Solar	Kyocera	KD135SX-QPU	135/95 W
8	10YMYM1016	Panel Solar	Kyocera	KD135SX-QPU	135/95 W

Fuente: Propia

Tabla 2 Baterías Laboratorio CUC

Baterías					
N°	Equipo		Modelo	Voltaje	Corriente
1	Bateria	Aheycar	HC1218	12V	18A/h
2	Bateria	Trojan	SCS225	12V	130A/20h - 105A/5h
3	Bateria	Trojan	SCS225	12V	130A/20h - 105A/5h
4	Bateria	Trojan	SCS225	12V	130A/20h - 105A/5h
5	Bateria	Trojan	SCS225	12V	130A/20h - 105A/5h
6	Bateria	Trojan	SCS225	12V	130A/20h - 105A/5h
7	Bateria	Trojan	SCS225	12V	130A/20h - 105A/5h

Fuente: Propia

Tabla 3 Modulo de Lorenzo DL Solar-B

Modulo de Lorenzo DL Solar-B			
N°	Equipo	Desig.	Modelo
1	Amp. Y Vatimetro	De Lorenzo 209	DL9010
2	DC/AC Convertidor	De Lorenzo 209	DL9013
3	Voltimetro CC/AC	De Lorenzo 219	DL9011
4	Regulador	De Lorenzo 219	DL9012
5	Rheostato	De Lorenzo 219	DL9018
6	Cargas Mod.1	De Lorenzo 219	DL9016
7	Control de Bateria	De Lorenzo 219	DL9014
8	Cargas Mod. 2	De Lorenzo 219	DL9017
9		De Lorenzo 219	DL9015

Fuente: Propia

Tabla 4 Reguladores e Inversores laboratorio CUC

Otros Equipos				
N°	Serie	Equipo	Desig.	Modelo
1	2410	Regulador de Voltaje	Ateca	SOLARIX PRS 3030
2	9340	Regulador de Voltaje	Ateca	SOLSUM 6.6F
3	4410	Regulador de Voltaje	Ateca	SOLARIX PRS 3030
1	C15343048	Inversor	XPOWER - Xantrex	Inversor 800
1		Lampara Led.		Iluminación Publica

Fuente: Propia

5.3 ESTADO DEL ARTE

5.3.1 Contexto Internacional

Dentro del marco global, las energías renovables hoy sin duda son un tema foco de estudio. La Energía Solar a través de Sistemas Fotovoltaicos en países como Alemania, España, Japón, Italia y Estados Unidos a nivel mundial son potencia en éstas y a la vez la producción de esta clase de energía. Entre ellos en España se encuentran muchos estudios y guías de cálculos para sistemas fotovoltaicos en esa región (1)

Hoy en día se encuentra un gran número instituciones académicas cuentan con laboratorios y sus respectivas practicas adecuadas a sus instalaciones. A nivel latinoamericano Chile abandera la región como foco en centros de investigación e implementación de esta tecnología, al igual que laboratorios en sus universidades y guías de laboratorios de sus programas académicos como la universidad de Universidad Talca de Santiago de Chile (2), aparte chile en el 2014 fundó el mayor laboratorio de irradiación solar en chile, por otra parte puerto rico también cuenta con laboratorios de sistemas fotovoltaicos como la Universidad de Puerto Rico Aguadilla (3).

5.3.2 Contexto Nacional

Dentro del contexto nacional ya existe una tendencia a la creciente en inversión de diversas universidades con la implementación de laboratorios de fuentes renovables y sistemas fotovoltaicos en sus instalaciones, como lo son la universidad Pontificia Bolivariana Medellín, Universidad autónoma de Bucaramanga, Universidad Distrital Francisco José De Caldas Bogotá.

Universidad autónoma de Occidente Cali desde el año 2007 esta Institución inició su recorrido en el tema de las energías renovables con la creación de un Laboratorio de Energías Alternativas y la instalación de un Sistema Solar Aislado en el Laboratorio de Vapor, que provee de energía eléctrica al sistema de iluminación del laboratorio. Esta iniciativa fue desarrollada como proyecto de grado alumnos de la institución y con el apoyo del Departamento de Planta Física de la Universidad. (4)

En la actualidad en la en la costa caribe las instituciones educativas de nivel superior no cuentan con laboratorios de fuentes no convencionales de energía, aunque la universidad del norte anuncio en febrero del 2014 (5) que construirá un laboratorio de energía solar, y Esta instalación hará parte de una nueva zona que se empezará a construir pronto en la Universidad, y que llevará el nombre de

"Construcciones sostenibles". Se espera que la energía que se produzca pueda ser utilizada en estas construcciones.

Esta ha impulsado a la Universidad de la Costa de contribuir con la implementación del laboratorio de fuentes renovables y el libro guía teórico-práctico acorde a las características de sus equipos, que busca promover la apertura a la investigación y desarrollo de tecnología fotovoltaica por medio de proyectos aulas implementando la guía en laboratorios con énfasis al uso de Sistemas Fotovoltaicos.

5.3.3 Alcances

- Desarrollar los fundamentos básicos de la conversión fotovoltaica de manera que el estudiante alcance el nivel de conocimientos necesario para comprender los fenómenos que tienen lugar en los sistemas solares fotovoltaicos
- Familiarizar al estudiante con los principales tipos de sistemas solares fotovoltaicos que existe en la actualidad y que se utilizan como elementos de conversión de la energía solar en energía fotovoltaica
- Estudiar las características de los sistemas solares fotovoltaicos y su influencia en los procesos de conversión energética
- Dar a conocer las diferentes aplicaciones en las que los sistemas solares fotovoltaicos intervienen
- Poner en contacto al estudiante con sistemas y dispositivos solares fotovoltaicos y potenciar sus habilidades técnicas y prácticas en la operación de tales sistemas y dispositivos
- Establecer una sinergia entre el mundo académico y el profesional que permita al estudiante mejorar su formación y conocer directamente los desarrollos tecnológicos y sistemas que operan en la sociedad
- Integrar el proceso de formación del alumno en las nuevas tendencias y desarrollos a través del contacto con las modernas líneas de trabajo, tanto científica como profesional, que se están desarrollando en la sociedad
- Conseguir que el estudiante alcance un nivel de conocimientos teórico-prácticos en el campo de la conversión solar fotovoltaica que le habilite para el desarrollo de la profesión tanto en el ámbito científico como en el profesional.

5.4 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

5.4.1 Delimitación Temporal

Este proyecto se realizó durante el Periodo comprendido del mes de Febrero del 2014 hasta el mes de Marzo dl 2105, con una dedicación promedio de 10 horas semanales.

5.4.2 Delimitación Espacial

Las Guías Teórico Practicas del Laboratorio de fuentes renovables de la Universidad de la Costa en este proyecto va dirigido como primer beneficiario a la Universidad de La costa y todas aquellas Instituciones con convenios con esta entidad que deseen utilizar el laboratorio y desarrollar sus prácticas.

5.4.3 Delimitación de la Población

La población que se beneficiaría con el desarrollo e implementación Las Guías Teórico-Prácticas del Laboratorio de fuentes renovables en sistemas Fotovoltaicos es la población, los estudiantes que cursa las asignaturas de Fuentes Renovables, y los que realicen el Diplomado en fuentes Renovables.

5.5 DEFINICIONES

5.5.1 La Energía Solar

Es una energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente de la luz y el calor emitido por el Sol. (6)

5.5.2 La Radiación Solar

Es energía liberada por el Sol. En un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por él está estrella que se encuentra a una temperatura media de 6000 °K en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear, que producen una pérdida de masa que se transforma en energía.

5.5.3 Irradiancia

La Irradiancia se refiere a la intensidad de la luz solar y su patrón de medida es el Kilovatio por kilómetro cuadrado [KW/Km²], entre más orientación hacia el sol tenga un arreglo fotovoltaico recibirá mayor Irradiancia. También se puede definir

como la magnitud que describe la radiación o intensidad de iluminación solar que llega hasta nosotros medida como una potencia instantánea por unidad de superficie, W/m^2 o unidades equivalentes

5.5.4 Irradiación

Es la cantidad de irradiancia recibida en un lapso de tiempo determinado, es decir, la potencia recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie. Se suele medir en Wh/m^2 o, en caso de un día, en $Wh/m^2/día$ o unidades equivalentes

5.5.5 Insolación

La Insolación es la cantidad de radiación recibida en un lapso de tiempo específico y su patrón de medida es el Kiloatio hora por kilómetro cuadrado [KWh/Km^2], el valor de la insolación que expone el sol en un día se conoce como Horas Solares Pico HPS, es decir, $1KWh/m^2 = 1HSP$.

5.5.6 Célula Fotovoltaica

Es un dispositivo que se encargan de realizar la conversión fotovoltaica de la luz solar en electricidad.

5.5.7 Eficiencia o rendimiento FV

Se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga (PM) y la Irradiancia incidente (PL) sobre la célula que es el producto de la irradiancia incidente G por el área de la célula S

5.5.8 Paneles Fotovoltaicos

Son un conjunto interconectado eléctricamente de células fotovoltaicas dentro de un marco de aluminio con hojas de polímetro y una cubierta frontal de vidrio templado que protege la disposición de las células colectoras que lo componen contra la intemperie.

5.5.9 Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Son los sistemas eléctricos fotovoltaicos que utilizan la energía producida de la conversión fotovoltaica para cubrir determinada demanda en lugares remotos, aislados de la Red.

5.5.10 Sistemas interconectados

Son los sistemas eléctricos fotovoltaicos conectados a la red de eléctrica de distribución que tienen como objetivo principal ampliar cada cierto periodo de tiempo (valorado anualmente en casos generales), la producción de la energía eléctrica que es inyectada dicha red.

5.5.11 Baterías

Son dispositivos de almacenamiento que convierten la energía acumulada en energía eléctrica por medio de una reacción química.

5.5.12 Estado de Carga EDC

Es la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía realmente almacenada. Interesa que sea un valor lo más alto posible (próximo al 100%, lo que indicaría que toda la energía utilizada para la recarga es factible de ser empleada en la salida de la instalación).

5.5.13 Profundidad de descarga PDD

Es la cantidad de energía, en tanto por ciento, que se obtiene de la batería durante una determinada descarga, partiendo del acumulador totalmente cargado. Está relacionada con la duración o vida útil del acumulador. Si los ciclos de descargas son cortos (en torno al 20%, por ejemplo), la duración del acumulador será mayor que si se le somete a descargas profundas (por ejemplo, del 80%).

5.5.14 Eficiencia de Carga

Es la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía realmente almacenada. Interesa que sea un valor lo más alto posible (próximo al 100 %, lo que indicaría que toda la energía utilizada para la recarga es factible de ser empleada en la salida de la instalación).

5.5.15 Horas de Sol Pico” o HPS [horas].

Se puede definir como el número de horas en que disponemos de una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m². Es decir, una hora solar pico “HPS” equivale a 1kWh/m² o, lo que es lo mismo, 3.6 MJ/m². Dicho en otras palabras, es un modo de contabilizar la energía recibida del sol agrupándola en paquetes, siendo cada “paquete” de 1 hora recibiendo 1000 watts/m².

5.5.16 Angulo β

Angulo de inclinación de los paneles o superficie con la Horizontal.

5.5.17 Angulo γ

Angulo de Orientación del Panel con respecto al eje Sur o Norte (azimut).

5.5.18 Ángulo Φ

Latitud geográfica del lugar donde se evalué la radiación.

5.5.19 Valor Nd

Corresponde al número de días desde el inicio del año hasta los transcurridos donde se evalúa la Radiación.

5.5.20 Ángulo α

Es la posición angular de la Tierra en la órbita solar.

5.5.21 Ángulo δ

Es ángulo de declinación natural del planeta Tierra con respecto a su eje de rotación

5.5.22 Consumo medio diario

Es el consumo eléctrico producido en media en un día cualquiera. Su unidad de medida es el Wh/día. El símbolo que emplearemos para medirlo es Lmd.

5.5.23 Consumo medio diario mensual

Es la media mensual del consumo anterior. A efectos prácticos, se supone que en cada mes del año el consumo es constante, por lo que coincidirán estos dos primeros consumos. En este capítulo se considerará así, por lo que el consumo medio diario y el consumo medio diario mensual serán el mismo, y sólo haremos uso del consumo medio diario.

5.5.24 Consumo total anual

El consumo total anual es el producto del consumo medio diario por el número de días de consumo a lo largo de un año. Su unidad de medida es el Wh. El símbolo que emplearemos para este consumo es LT.

5.5.25 Consumo medio diario anual

Es la media del consumo anterior. Cuando el consumo medio diario es constante (todos los días se suponen con un mismo consumo), el consumo medio anual y el consumo medio diario coincidirán. En cualquier otro caso no será así, como se podrá comprobar en los ejemplos que se muestran

5.5.26 Días de Autonomía

Es el número de días consecutivos que en ausencia de sol, el sistema de acumulación es capaz de atender el consumo, sin sobrepasar la profundidad de descarga máxima estacional de la batería. Los días de autonomía posibles, dependen entre otros factores del tipo de instalación y, sobre todo, de las condiciones climáticas del lugar.

5.5.27 Regulador

El regulador es el elemento que controla las cargas y descargas de la batería, permitiendo el proceso de carga de la misma desde el generador fotovoltaico y el proceso de descarga a través de los elementos de consumo eléctrico del sistema global.

6 METODOLOGÍA

Este proyecto, se ajusta de acuerdo a la información de los equipos con que cuenta el laboratorio de fuentes renovables de la Universidad de la Costa y su respectiva documentación para satisfacer las competencias que se quiere cubrir con cada una de las experiencias a desarrollar, para fortalecer la formación concientizada hacia la implementación de modelos de generación a través de la tecnología Fotovoltaica en pro de una formación eco-ambiental basada en las fuentes no convencionales de energía.

Los temas y datos de estas guías Teórico-Prácticas se toman del reconocimiento que se efectúa de los procesos de construcción del conocimiento, que es de lo más básico a lo complejo y también de la interpretación acerca de las teorías sostenidas de tópicos para energías fotovoltaicas.

El Libro Guía es el aporta un análisis inicial de los tipos de procesos y procedimientos cognitivos a cerca de Sistemas con Paneles fotovoltaicos para que los estudiantes lo empleen y a partir de estos conocimientos desarrollen sus propios proyectos.

6.1 BASE DE LA GUIA DE LABORATORIO

La guía teórica-practica elaborada en este proyecto está estructurada por 5 capítulos, en su orden, el inicial es un capítulo introductorio a la temática de la tecnología fotovoltaica en el cual se dan los conceptos básicos de lo que será el desarrollo de las unidades restantes. Dentro de los capítulos siguientes se entregan 5 experiencias prácticas que se deben realizar con los instrumentos y equipos con los que cuenta el Laboratorio de Fuentes Renovable de la universidad, en los que se resaltan los módulos y células fotovoltaicas, Solarímetro módulo de Lorenzo y Kits de conexión Horizon. El cuarto capítulo de la guía cuenta con 3 experiencias, una de ellas Aplicativa, una Práctica y otra de carácter Investigativa, estas con el fin de cumplir con la metodología de estudio de investigación básica y aplicada. En el último capítulo se desarrolla una experiencia especial en el cual se instruye al estudiante al modelamiento de propios prototipos en los que pueda desarrollar todo lo aprendido en las experiencias y teorías de analizadas de las guías situadas en los capítulos anteriores ya desarrollados.

6.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS GUIAS DE LABORATORIO

Al finalizar cada una de las experiencias el estudiante tendrá la facultad de validar con su criterio el comportamiento característico de los dispositivos implementados para el desarrollo de cada experiencia, basándose en resultados y realizando análisis correspondientes a las variables eléctricas valoradas durante el desarrollo de la práctica. Pero para cumplir con esto, se deben realizar con atención cada uno de los puntos que comprenden la estructura de la guía de laboratorio.

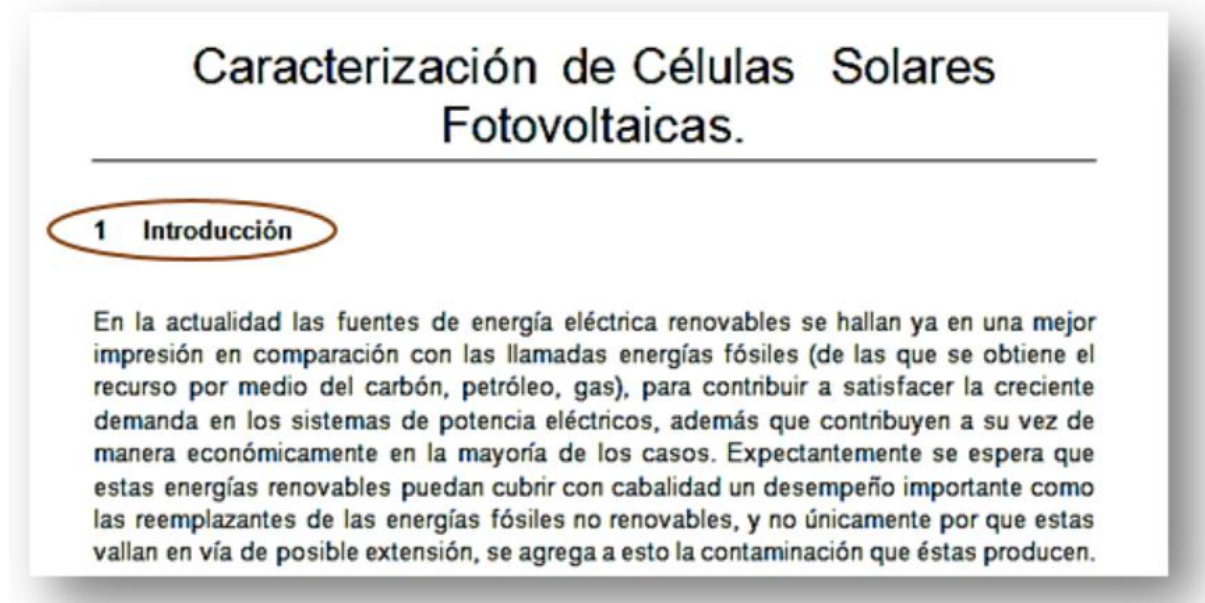
6.2.1 Estructura

Las guías de prácticas del laboratorio están estructuradas por 5 etapas o fases fundamentales, en la que se distribuye el ordenamiento de la información necesaria para el desarrollo y ejecución de la experiencia. Las fases a las que se le ha hecho mención son:

6.2.1.1 Etapa 1- Introducción.

La primera etapa es la fase Introductoria, donde se muestra al estudiante el estado de la tecnología que se implementa para la aplicación de la experiencia.

Ilustración 2. Etapa Introducción



Fuente: Propia

6.2.1.2 Etapa 2- Marco Teórico.

En la segunda etapa se consignan las pautas teóricas que le permitirán al estudiante conocer los conceptos teóricos para el desarrollo práctico y la contextualización de los resultados.

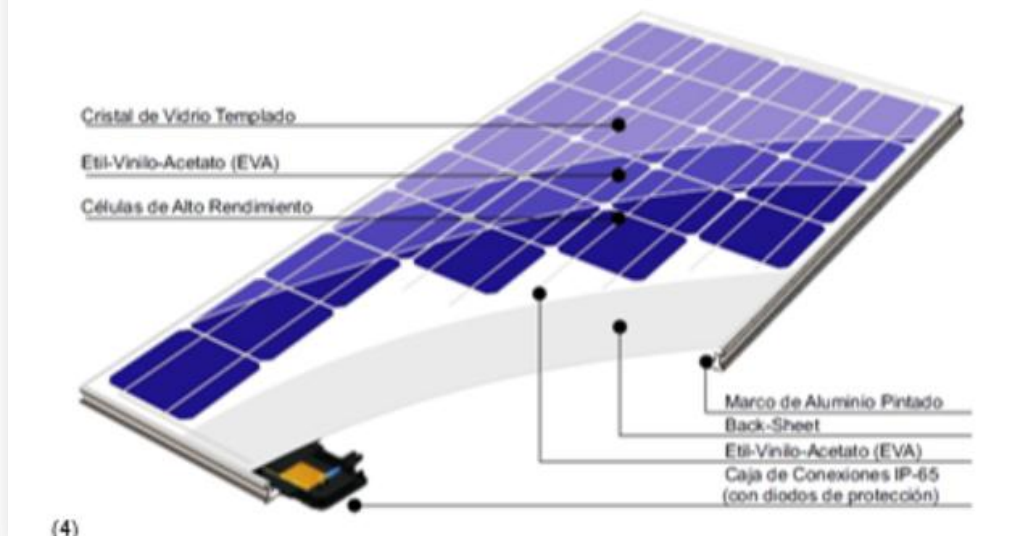
Ilustración 3. Etapa Marco Teórico

3.1.2 Marco Teórico

3.1.2.1 Paneles Fotovoltaicos

Los Paneles solares de tecnología fotovoltaica, también denominados Módulos, son un conjunto interconectado eléctricamente de células fotovoltaicas dentro de un marco de aluminio con hojas de polímetro y una cubierta frontal de vidrio templado que protege la disposición de las células colectoras que lo componen contra la intemperie. Por lo general son de fácil transportar e instalar, al no tener partes móviles se caracterizan por que requieren de un mantenimiento mínimo, más su durabilidad y alta confiabilidad de operación permiten al fabricante otorgar una garantía por defectos de dispositivo y reducción de eficiencia de un promedio hasta de 25 años. En el actual mercado se encuentran paneles de 10W a 300W de generación, siendo un valor comercial el modelo de 50W de potencia nominal.

Ilustración 34. Estructura general de un Panel Fotovoltaico.

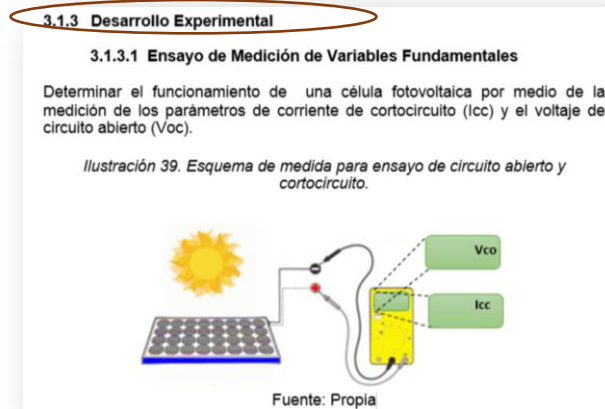


Fuente: Propia

6.2.1.3 Desarrollo Experimental

La tercera etapa es en la que se designan los ítems a valorar en la práctica junto a su proceso, además de esquemas de conexión y la asignación de los materiales necesarios para la ejecución de la experiencia.

Ilustración 4. Etapa Desarrollo Experimental



Fuente: Propia

6.2.1.4 Resultados

En la Cuarta etapa de la práctica se entregan los resultados obtenidos en las tablas de lecturas de mediciones, para un posterior análisis y evaluación de cálculos de los valores obtenidos en curvas de estudio de comportamiento para las prácticas que lo requieran.

Ilustración 5. Etapa Resultados

3.1.5 Resultados

En base a los datos obtenidos llenar la tabla de resultados de medición. Con las variables se determinan los parámetros operacionales del panel fotovoltaico en los diferentes ángulos de inclinación, los que se utilizarán para realizar el cálculo del rendimiento y el Factor de forma de cada caso. Realizar las Gráficas de relación de parámetros, curvas de Corriente-Voltaje y de Potencia-Voltaje.

3.1.5.1 Mediciones de parámetros fundamentales:

Ilustración 42. Datos del ensayo del ensayo al panel FV.

Hora	Medición Célula	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Inclinación [°]	Potencia [W]	Rendimiento [%]
:	Vacío [V _{co}]					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:						0		
:	Cortocircuito [I _{cc}]					30		
:						60		
:						90		
:								

Fuente: Propia

6.2.1.5 Análisis de Resultados

Esta etapa es en la cual el estudiante interpreta los resultados obtenidos y en base a estos entrega las conclusiones, comentario, afirmación y validación de criterios en la cual se debe redactar la comprensión de los hechos ocurridos en el desarrollo de la experiencia.

Ilustración 6. Etapa Análisis de Resultados.

3.1.6 Análisis de Resultados Conclusiones

Con los resultados obtenidos realizar el análisis operacional del panel fotovoltaico caracterizado, entregar conclusiones del comportamiento de los parámetros graficados teniendo en cuenta el rendimiento por cada caso de ángulo de inclinación.

--

Fuente: Propia

7 GUÍA TEÓRICA PRACTICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

INTRODUCCIÓN A LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

En la actualidad las fuentes de energía eléctrica renovables se hallan ya en una mejor impresión en comparación con las llamadas energías fósiles (de las que se obtiene el recurso por medio del carbón, petróleo, gas), para contribuir a satisfacer la creciente demanda en los sistemas de potencia eléctricos, además que contribuyen a su vez de manera económicamente en la mayoría de los casos. Expectantemente se espera que estas energías renovables puedan cubrir con cabalidad un desempeño importante como las reemplazantes de las energías fósiles no renovables, y no únicamente porque estas vayan en vía de posible extensión, se agrega a esto la contaminación que éstas producen.

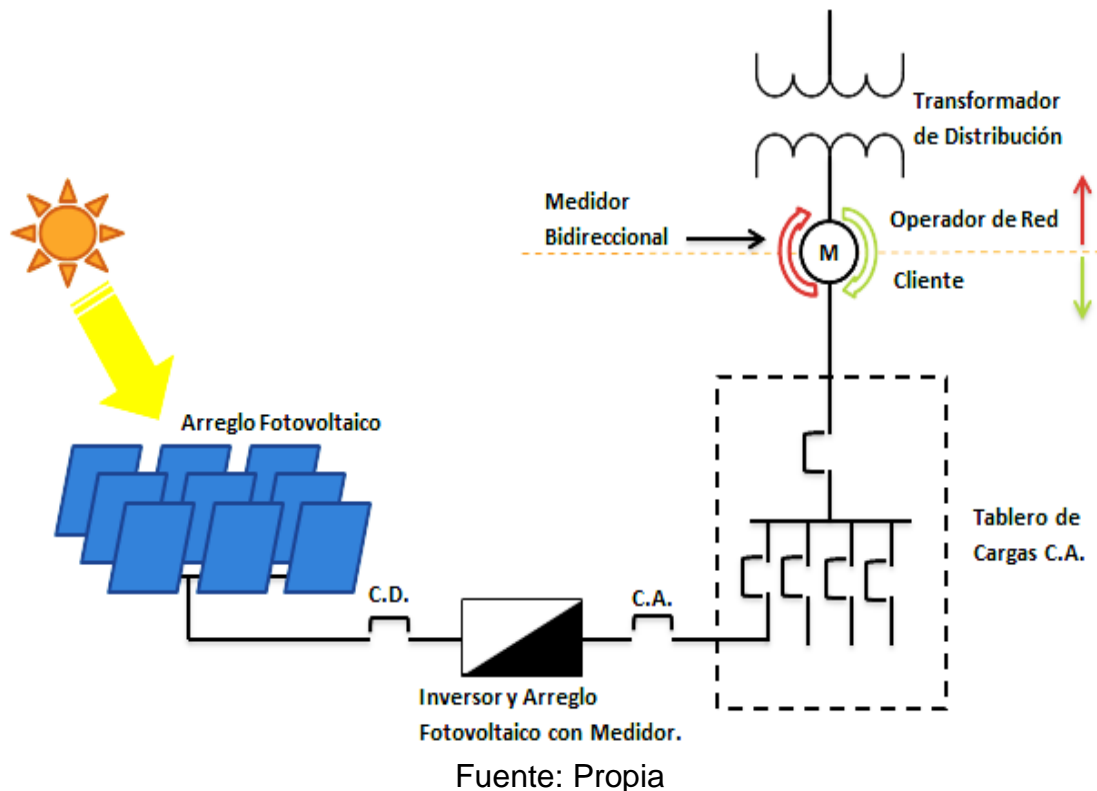
Si se busca confiabilidad y una generación limpia a variables escalas la denominada Energía Solar Fotovoltaica hace parte de estas energías renovables. De aquí se puede definir la Tecnología Fotovoltaica como la fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, adquirida directamente a partir de la radiación solar mediante unos dispositivos semiconductores denominados Celdas o células fotovoltaicas, por medio de estos la luz emitida por el sol es transformada directamente en electricidad. De esta manera se considera a un sistema fotovoltaico como otro sistema de generación de energía eléctrica, con la diferencia de los equipos implementados no tan convencionales como los sistemas de generación clásica electromecánica. No obstante, son los mismos principios de operación interconexión, y en la actualidad ya se están guías, normas y códigos establecidos, y como todo sistema de potencia con el arreglo fotovoltaico se genera energía por medio de su exposición a la luz natural del sol, pero se hace necesario otros elementos de conducción, de control, conversión, de distribución y almacenamiento.

Dentro de los puntos a favor que ofrece un arreglo de dispositivos fotovoltaicos se encuentra la disminución de la dependencia de energía, lo más importante quizá es mencionar que la energía que se produce por la luz solar es renovable, limpia y adicionalmente económica, no hay costos de instalación y mantenimiento de las redes, haciendo énfasis en cuando se trata de éstas en zonas aisladas. La simplicidad de instalación permite que la potencia pueda variar en niveles requeridos sin afectar dicha instalación ya que se opera con módulos, lo que hace la tecnología fotovoltaica baja en niveles de riesgos, fallas y operaciones de mantenimiento.

Actualmente se diseñan y construyen los sistemas fotovoltaicos aisladamente para operar de forma remota, ya sea para instalaciones domiciliarias, zonas rurales donde es baja la demanda de energía. Aún es muy reciente la implementación de esta tecnología pero con las características de que el precio de KWh es de mayor costo al de otras tecnologías convencionales.

Por otro lado el desarrollo de la tecnología fotovoltaica ha incrementado una mayor tasa de confiabilidad para los sistemas de forma directa entregando una mayor eficiencia, agregando a que es posible solución a problemas ambientales. La siguiente ilustración esquematiza la conexión de los elementos de un sistema fotovoltaico:

Ilustración 7. Diagrama Unifilar del Arreglo Fotovoltáico Típico conectado a la Red.



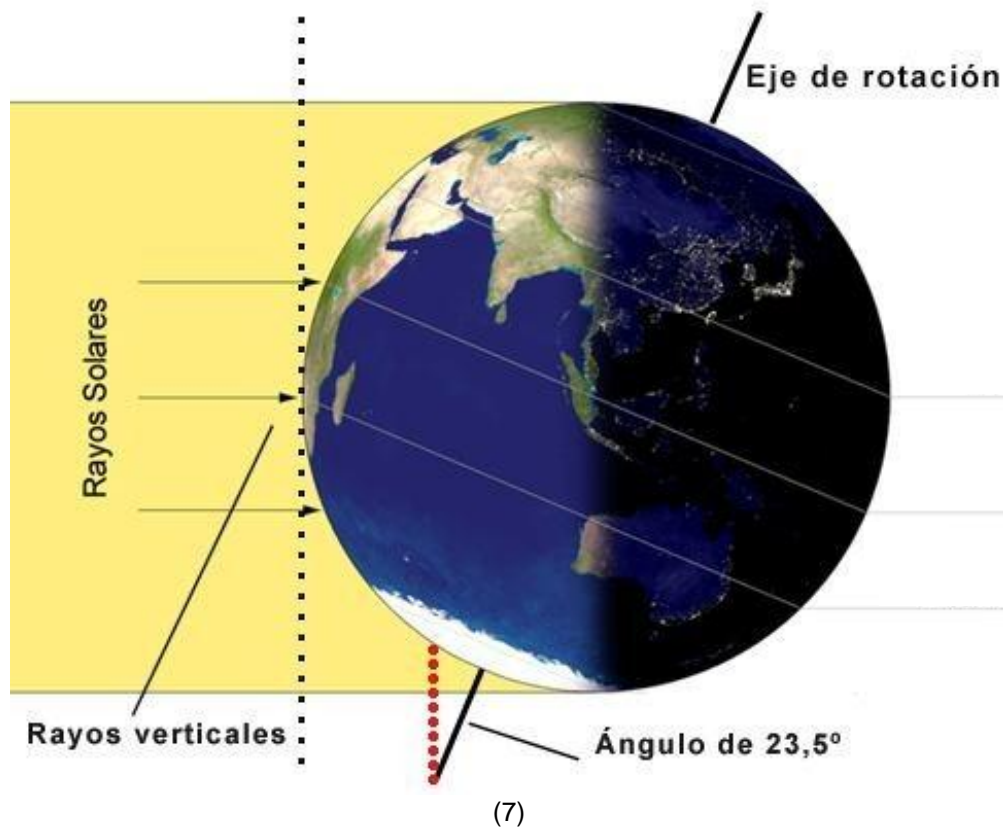
LA ENERGÍA SOLAR

Es una energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente de la luz y el calor emitido por el Sol. (6) Los motivos por lo que la incidencia de la radiación solar no son tan simples de resolver radica en que la radiación solar es aleatoria, esto hace que no se determine como una variable exacta. Además se deben considerar la posición y los movimientos de Rotación del sol (Alrededor de su eje) y de Traslación de la Tierra (Orbital alrededor del sol).

Para esto se tiene el dato de Eje de Rotación Terrestre aproximadamente a un ángulo de 23.45° con el plano de la elíptica, esto es llamado en la ciencia como oblicuidad de declinación Solar.

La declinación solar del planeta Tierra es la recta que une los centros de la tierra y el sol y que cambian entre $+23.45^\circ$ y -23.45° , a este ángulo. A continuación el ejemplo de la declinación de la Tierra en la siguiente ilustración:

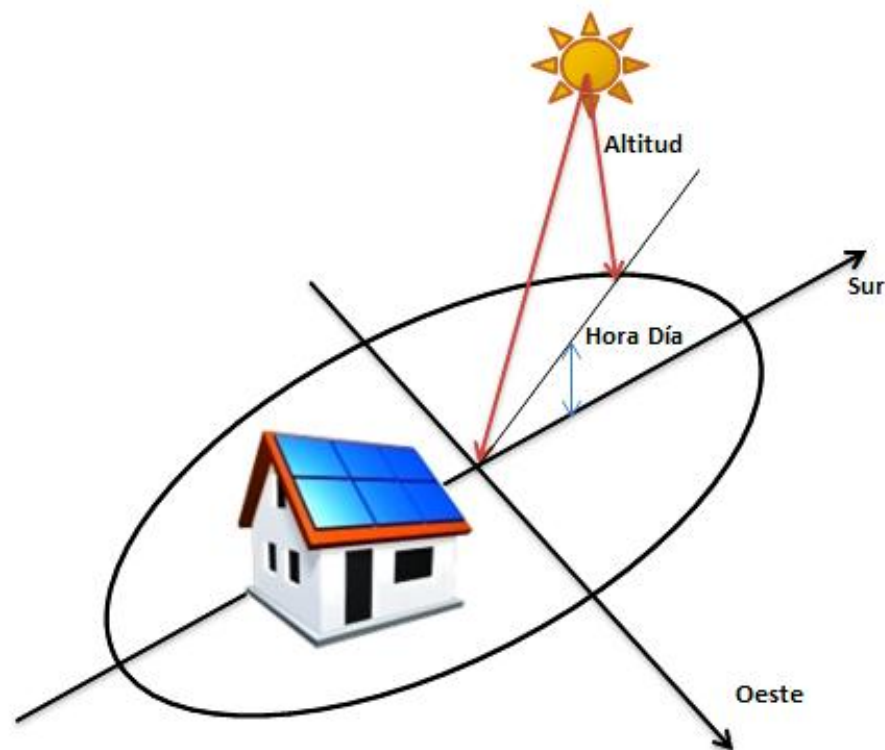
Ilustración 8. Inclinación del eje de rotación de la Tierra.



Se debe tener en cuenta la declinación ya que con esta se hacen nulos los equinoccios y solsticios que hacen variantes la duración del día en diferentes épocas del año. En los equinoccios coinciden la duración de la noche y el día, por lo que la puesta y salida del sol coinciden con el este y oeste ecuatorial respectivamente. En los Solsticios la duración del día se hará mayor o menor (dependiendo el hemisferio) debido a la declinación que varía en el rango de $\pm 23.45^\circ$.

Existen dos ángulos que determinan la posición del sol, denominados Altura y Azimut, el primero se define como el ángulo que forma el sol con respecto al horizonte terrícola, y el segundo es la proyección de la estrella perspectiva al sur de la Tierra. Aunque no se hace relevante para saber si habrá sombras que obstruyan la luz solar hacia los paneles, con ellos se crea la trayectoria durante el desarrollo del día del sol. En la siguiente ilustración se describe la trayectoria del sol y los ángulos proyectados debido a su posición:

Ilustración 9. Trayectoria del Sol debido a sus ángulos de posición proyectadas.



Fuente: Propia

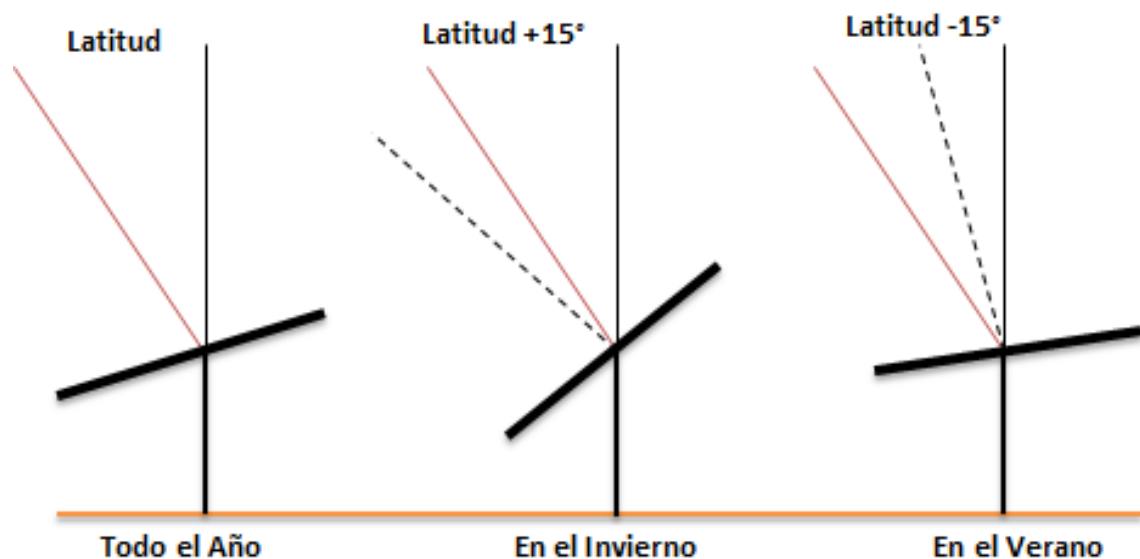
LA RADIACIÓN SOLAR

Es energía liberada por el Sol. En un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por él está estrella que se encuentra a una temperatura media de 6000 °K en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear, que producen una pérdida de masa que se transforma en energía.

El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a la temperatura ya citada. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiación, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado). (8)

El ángulo general óptimo de inclinación de los paneles de un arreglo fotovoltaico lo define la Latitud, ya que si se tiene como referencia se podrá asegurar la máxima cantidad de luz solar expuesta durante el año al arreglo fotovoltaico. Las inclinaciones sugeridas se ilustran a continuación:

Ilustración 10. Inclinación Sugerida dependiendo el periodo.

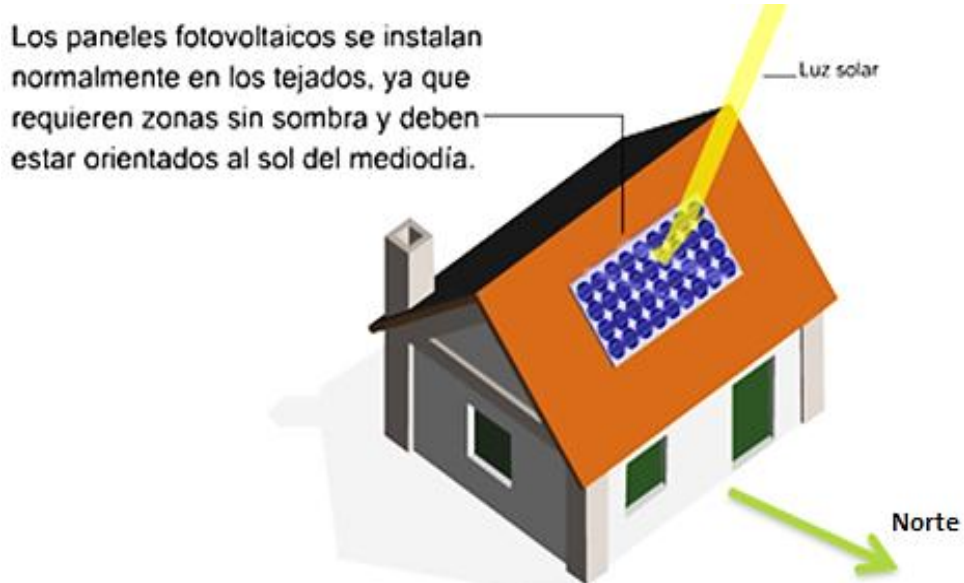


Fuente: Propia

Generalizando la orientación se hace óptima hacia el norte (si la colocación de los paneles se encuentra en el hemisferio Sur del continente) y la altura del sol en la mitad de los equinoccios, el ángulo dependerá de la latitud. Cuando se requiera un sistema que demande mayor potencia, la instalación debe contar con una mayor superficie que ira proporcionalmente a la relación económica y confiable del arreglo de paneles orientales.

Teniendo en cuenta pautas como aprovechamiento de zonas soleadas o sin sombras, la orientación e incluso la inclinación, se da ejemplo de la orientación de un montaje óptimo para un sistema con panel solar fotovoltaico en la siguiente ilustración:

Ilustración 11. Montaje óptimo con orientación hacia el norte.



(9)

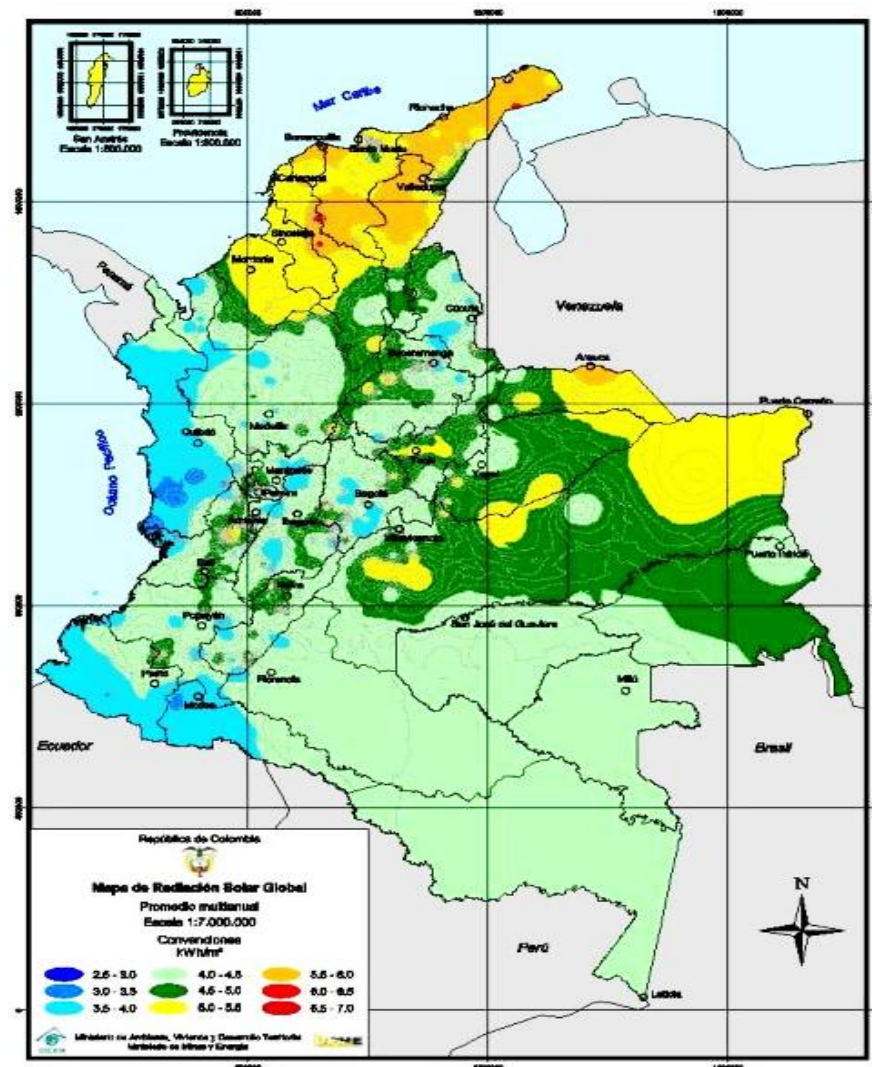
IRRADIANCIA E INSOLACIÓN

Son los principales términos característicos para determinar el recurso solar en un sitio geográfico. El primer término, **la Irradiancia** se refiere a la intensidad de la luz solar y su patrón de medida es el Kilovatio por kilómetro cuadrado [KW/Km^2], entre más orientación hacia el sol tenga un arreglo fotovoltaico recibirá mayor Irradiancia.

La Insolación es la cantidad de radiación recibida en un lapso de tiempo específico y su patrón de medida es el Kilovatio hora por kilómetro cuadrado [KWh/Km^2], el valor de la insolación que expone el sol en un día se conoce como Horas Solares Pico HSP, es decir, $1\text{KWh}/\text{m}^2 = 1\text{HSP}$.

La siguiente ilustración es el mapa de irradiación solar nacional, en el cual se muestran las zonas de mayor irradiancia e insolación durante un periodo determinado del año. Este es válido para determinar las regiones con mayor recurso solar.

Ilustración 12. Mapa de Irradiación Solar en Colombia.



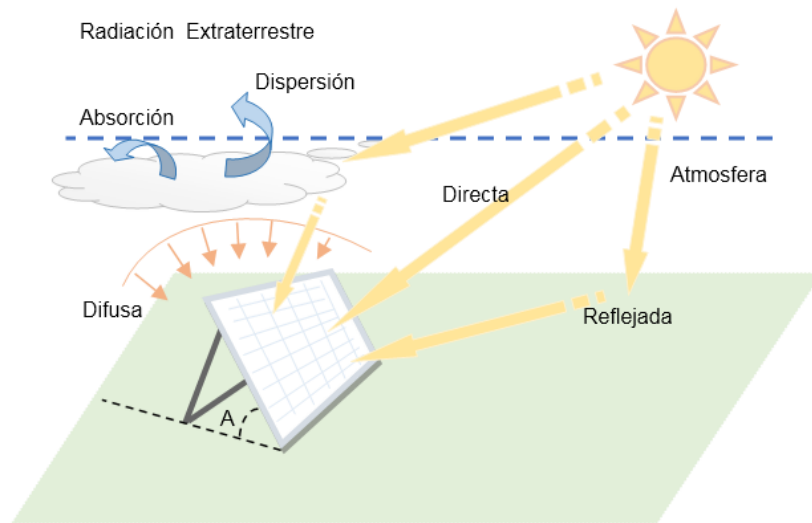
(10)

La Irradiancia es un parámetro fundamental a la hora de realizar el dimensionamiento de un proyecto de tecnología fotovoltaica, ya que desde el

tamaño de éste hasta la conexión entre los paneles dependen mucho del valor de la Irradiancia en el sitio de la instalación.

En la siguiente ilustración se muestran los diferentes tipos de radiaciones que son recibidos por los dispositivos de captación solar fotovoltaica:

Ilustración 13. Radiación sobre un Panel.

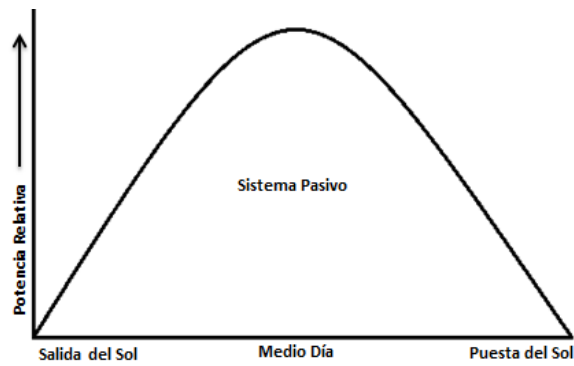


Fuente: Propia

Para que haya aprovechamiento de la Irradiancia hay otro factor de que influye en esto, es la Posición del arreglo, puede darse de dos tipos:

Arreglo Fijo: su orientación y ángulo de inclinación se caracteriza por que su único movimiento es el relativo del sol con referencia a la Tierra. Estos son denominados Sistemas Solares Pasivos. Su curva de operación se ilustra a continuación:

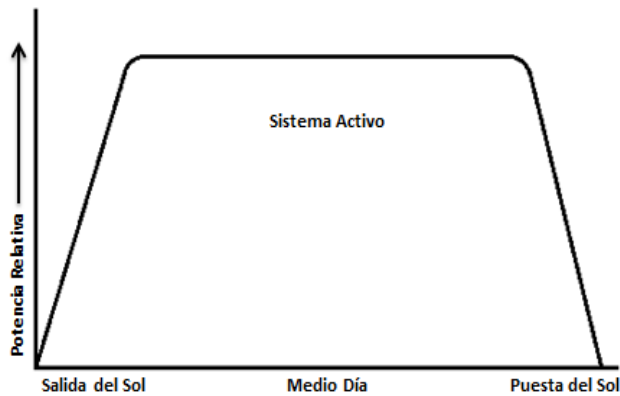
Ilustración 14. Aprovechamiento de la Potencia de un sistema Pasivo.



Fuente: Propia





Arreglo Activo: También denominado como arreglo Orientable o seguidor solar, estos sistemas son más eficientes, ya que aprovechan mucho más la radiación solar, ya que en estos los paneles captadores tienen un mecanismo por medio del cual pueden seguir la posición del sol.

Ilustración 15. . Aprovechamiento de la Potencia de un sistema Activo.



Fuente: Propia

Tabla 5. Productividad Según la Orientación e Inclinación de los Paneles Fotovoltaicos.

Orientación Posible	Inclinación			
	0° 	30° 	60° 	90° 
Norte	93%	100%	91%	68%
Nor.Este Nor.Oeste	93%	96%	88%	66%
Este Oeste	93%	90%	78%	55%

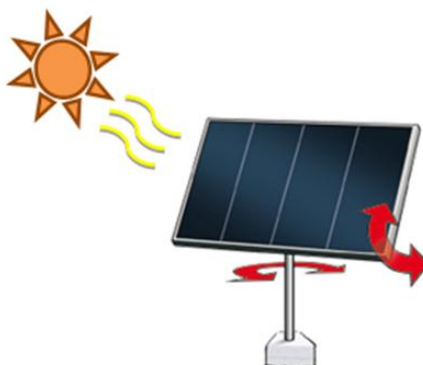
Fuente: Propia

Algo que se debe tener muy en cuenta es que el ángulo de inclinación de los paneles no debe ser menor a 10°, ya que de esta manera se evita la acumulación de polvo sobre los acumuladores.

SISTEMAS SEGUIDORES

Este tipo de arreglo fotovoltaico se mantiene orientado hacia el sol durante el mayor número de horas del día, esto permite una mayor cantidad de insolación y en efecto la energía producida, esto alcanza de 15% a 30% de eficiencia con respecto a un sistema pasivo, dicho rango varía dependiendo a la latitud del lugar y la época del año.

Ilustración 16. Panel Seguidor Solar Fotovoltaica.



Fuente: Propia

SOPORTES DE SISTEMAS ACTIVOS

Colocación Sobre Soporte Estático: Soporte sencillo sin movimiento, es el sistema más común en las instalaciones.

Sistema de Seguimiento de Un Eje: Pueden realizar un cierto seguimiento solar, la rotación sobre un solo eje, ya sea horizontal, vertical u oblicuo. El seguimiento es sencillo y relativamente económico, pero limitado a un solo movimiento.

Sistema de Seguimiento de dos Ejes: Con este tipo de sistema se puede hacer un seguimiento total del sol, en latitud y azimut, de esta forma la radiación solar siempre será perpendicular a la orientación del panel. Los subsistemas básicos de este tipo son:

- ✓ Sistemas Mecánicos.
- ✓ Con Dispositivos de ajuste automático.
- ✓ Dispositivo Dilatador de

1 CAPÍTULO 1: ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

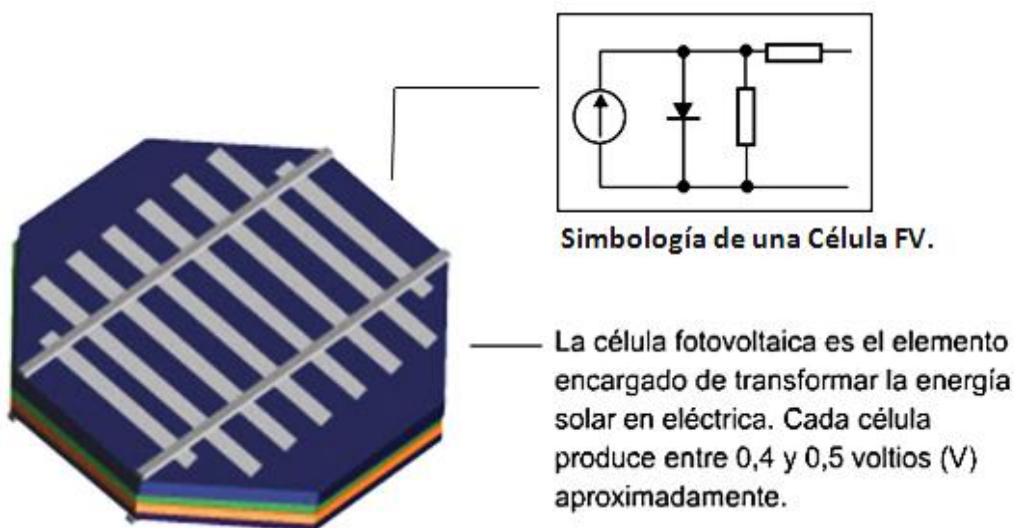
1.1 CARACTERIZACIÓN DE CÉLULA FOTOVOLTAICA CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL Y NATURAL.

1.1.1 Introducción

Gracias a la tecnología fotovoltaica hoy es posible realizar la conversión de energía proveniente de la irradiación solar en energía eléctrica a través del proceso que se basa en la utilización de semiconductores foto (luz) – voltaico (voltaje). Este proceso fotovoltaico es el de la generación de fuerza electromotriz como equivalente a la absorción de radiación ionizante obtenida por los paneles captadores. La energía generada puede ser utilizada de inmediato o almacenada en un banco de batería para una posterior implementación.

Las **Células Fotovoltáicas** o **Células Solares**, son los dispositivos que se encargan de realizar la conversión fotovoltaica de la luz solar en electricidad. Las células FV son transductores que trabajan con la radiación recibida, básicamente trabajan diodos semiconductores y que pueden generar de 0.5V a 1V dependiendo del material que lo componga y de las condiciones climatológicas que incidan en el sitio de instalación. Los materiales más eficientes en este proceso son los semiconductores, usualmente se utiliza el **Silicio** para la construcción de las células solares (ver ilustración 17), éstas compuestas por láminas delgadas del material semiconductor que formaran un campo eléctrico positivo y negativo respectivamente en dos contactos.

Ilustración 17. Célula Fotovoltaica de Silicio.



(9)

En los elementos semiconductores se da como características que los fotones de la luz solar son absorbidos creando electrones libres y agujeros, con energías más altas que los electrones que proporcionan la vinculación en la base de cristal. Una vez que estos pares de huecos o agujeros de electrones libres son creados, nace un campo eléctrico para inducir estos electrones de energías más altas a fluir fuera del semiconductor, esto se da gracias al uso de las uniones p-n, ya que este recoge los electrones en una dirección y los agujeros en otra (ver ilustración 19). A continuación se ilustra la composición física de una célula fotovoltaica. (11)

Ilustración 18. Composición de una Célula FV de Silicio.

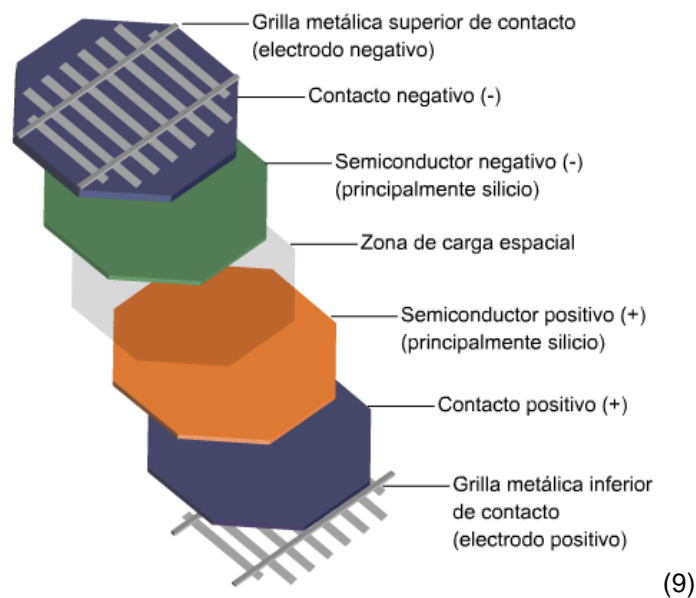
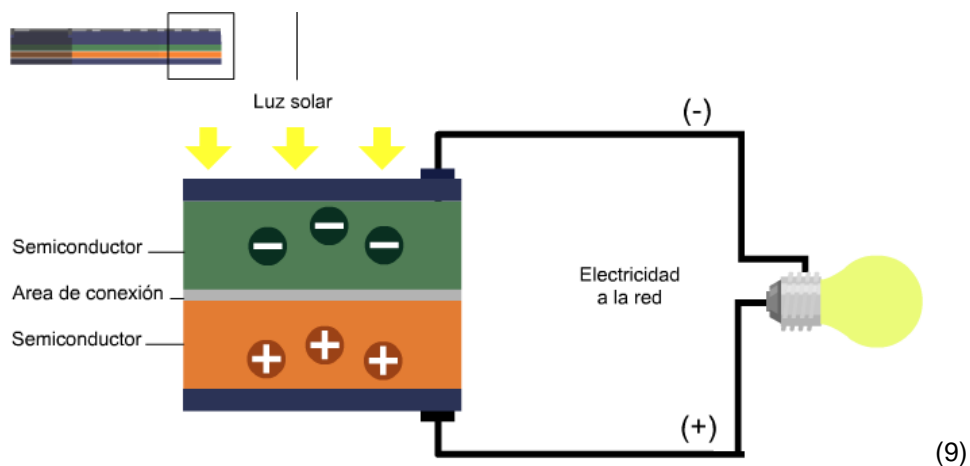


Ilustración 19. Principio Básico de operación de tecnología fotovoltaica.



La energía eléctrica generada por las células fotovoltaicas tiene como características que es una corriente continua C.C. con ella se puede alimentar cargas de corriente directa conectadas al sistema, o puede implementarse un inversor de corriente para realizar la transformación de las características de energía y convertirla a corriente alterna C.A.

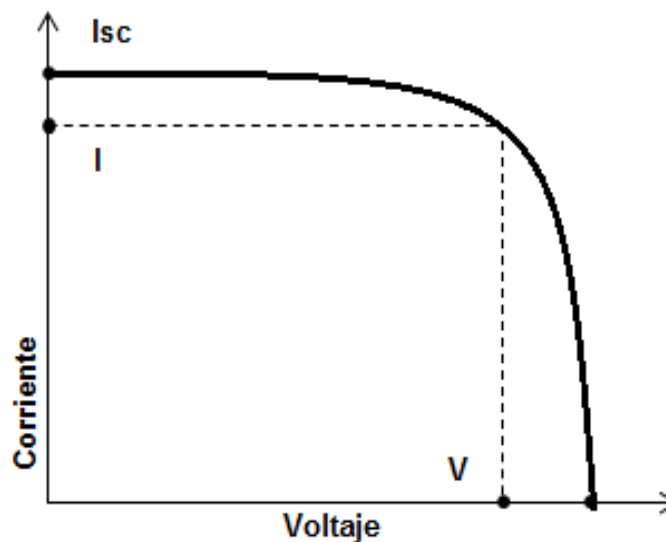
Las células solares no requieren de mucho mantenimiento y se caracterizan por una larga vida útil. En los lugares desérticos es posible utilizarlos al no tener partes mecánicas móviles intrínsecas y tener sus componentes electrónicos de estado sólido. Económicamente la energía fotovoltaica es prácticamente costosa, aunque hay aplicaciones en la es más barata que otras y también es preferida ya que no tiene un impacto ambiental considerable.

1.1.2 Marco Teórico

Eléctricamente las características de operación de las células fotovoltaicas están dadas por la curva de comportamiento de corriente producida en un rango de voltaje generación (I-V). Para que se considere eficiente la potencia de entrega, la célula FV debe operar a un voltaje óptimo, puesto si no la potencia se reducirá.

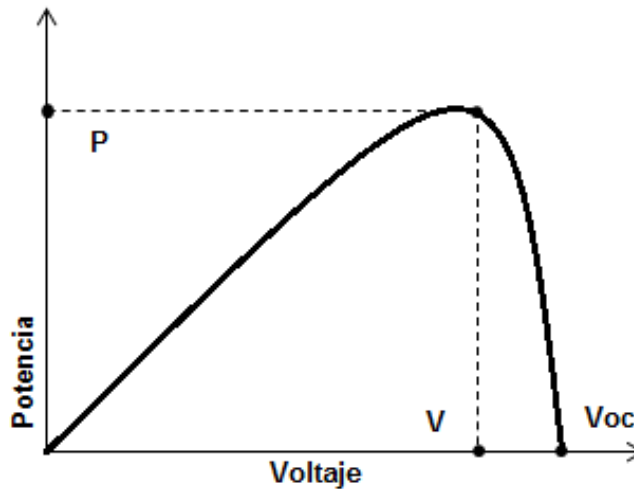
Las curvas de operación se muestran en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 20. Curva I-V operacional de Célula FV.



Fuente: Propia

Ilustración 21. Curva P-V operacional de célula FV.



Fuente: Propia

En el caso de los sistemas fotovoltaicos independientes el nivel de voltaje de la batería, determinará el voltaje de operación en que operará el módulo (conjunto de células solares interconectadas). El **Punto de máxima potencia (P)** es el producto del valor de tensión máxima (VM) e intensidad máxima (IM) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

El Factor de forma (FF): Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito, es decir:

Ecuación 1. Factor de Forma.

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

Dentro de los parámetros que determinan el funcionamiento de estos dispositivos está la corriente de cortocircuito (I_{cc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). (12)

1.1.3 Tensión de Circuito Abierto [V_{oc}]:

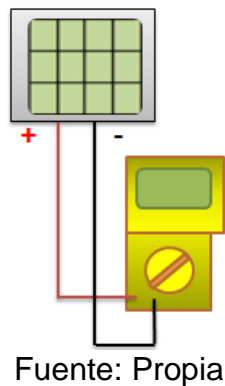
Es el máximo valor de tensión en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga.

1.1.4 Corriente de Cortocircuito [I_{cc}]:

Es el máximo valor de corriente que circula por una célula fotovoltaica y se da cuando la célula está en cortocircuito.

Para realizar las mediciones de tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito se deben realizar las conexiones descritas en la siguiente ilustración:

Ilustración 22. Conexión para las medidas de Tensión y Corriente de la Célula.



1.1.5 Eficiencia o rendimiento FV:

Se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga (P_M) y la Irradiancia incidente (P_L) sobre la célula que es el producto de la irradiancia incidente G por el área de la célula S :

Ecuación 2. Rendimiento.

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_M \cdot V_M}{P_L}$$

A tener en cuenta que la influencia de la temperatura en los parámetros básicos de una célula fotovoltaica, puede aumentar la temperatura de la célula y empeora el funcionamiento de la misma:

- Aumenta ligeramente la Intensidad de cortocircuito.
- Disminuye la tensión de circuito abierto, aprox: $-2.3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$
- El Factor de Forma disminuye.
- El rendimiento decrece. (12)

1.1.6 Desarrollo Experimental

Determinar el funcionamiento de una célula fotovoltaica por medio de la medición de los parámetros de corriente de cortocircuito (I_{cc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Para esto se debe realizar el ensayo de medición de variables fundamentales.

1.1.6.1 Ensayo de Medición de Variables Fundamentales

Desarrollar el ensayo en los casos de iluminación natural y artificial mediante la aplicación de los esquemas de conexión. Los valores medidos se describirán en las tablas de resultado respectivas (tabla 6 y tabla 7). Los esquemas de conexión son descritos en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 23. Esquema de conexión para el ensayo realizado en el interior (iluminación artificial).

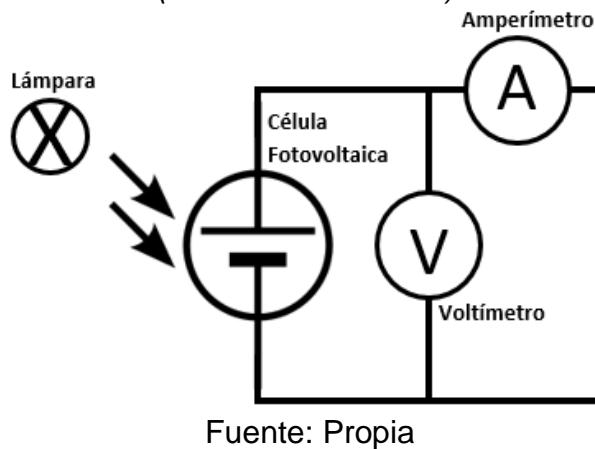
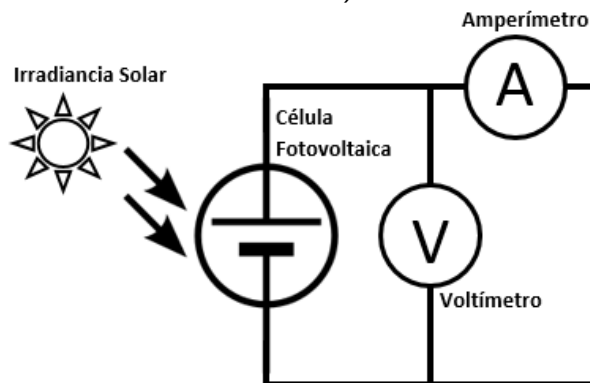


Ilustración 24. Esquema de conexión para el ensayo realizado en el exterior (luz natural).



Fuente: Propia

1.1.7 Materiales para el desarrollo de la práctica

1.1.7.1 Ensayo iluminación Artificial:

- ✓ 1 Célula Solar FV de 0.5V @2A
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro.
- ✓ Polímetro con medición de Temperatura.
- ✓ 2 Conectores caimanes 60 -70 cm
- ✓ 1 Resistencia de 0.1Ω @22W
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ 1 Lámpara PAR-38 de PHILIPS de 110V@100W
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)

1.1.7.2 Ensayo Luz Natural:

- ✓ 1 Célula Solar FV de 0.5V @2A
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ Polímetro con medición de Temperatura.
- ✓ 2 Conectores caimanes 60 -70 cm
- ✓ 1 Resistencia de 0.1Ω @2W
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)

1.1.8 Resultado

1.1.8.1 Resultados de la medición obtenida en el ensayo de Luz Artificial:

Tabla 6. Resultados Caracterización Luz Artificial.

	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]
Vco					
Icc					

Fuente: Propia

Con base a los resultados obtenidos se realizara las Gráficas de relación de parámetros, las Curvas de Corriente-Voltaje y de Potencia-Voltaje. Con esta utilizar los datos para realizar el cálculo del rendimiento y el Factor de Forma de la célula fotovoltaica caracterizada con la radiación de la lámpara.

1.1.8.2 Resultados de la medición obtenidas en el ensayo de Luz Natural:

Tabla 7. Resultados Caracterización Luz Natural.

	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]	Radiación [W/m²]	Temperatur a [°C]
Vco					
Icc					

Fuente: Propia

Con base a los resultados obtenidos se realizara las Gráficas de relación de parámetros, las Curvas de Corriente-Voltaje y de Potencia-Voltaje. Con esta utilizar los datos para realizar el cálculo del rendimiento y el Factor de Forma de la célula fotovoltaica caracterizada con la radiación solar.

1.1.9 Análisis de Resultados Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos realizar el análisis de comportamiento de las Curvas, rendimiento operacional y del factor de forma del dispositivo estudiado en los ensayos. Comparar los datos obtenidos con el comportamiento esperado habitual como en la influencia de la temperatura, si hay aumento de la Intensidad de cortocircuito, Disminución de la tensión de circuito abierto y los comportamientos del Factor de Forma y el Rendimiento.

Análisis:

1.2 PARÁMETROS DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.

1.2.1 Introducción

El conocimiento de los parámetros de una célula fotovoltaica, permite saber la energía eléctrica que esta puede suministrarle a un nivel de tensión de generación del dispositivo a una carga que sea conectada a esta. Una célula solar bajo la demanda de una carga cuando ésta está iluminada, produce una diferencia de potencial en los polos extremos de la carga y circula una corriente por ella, es decir, produce el efecto fotovoltaico.

La flujo de electrones entregada a una carga tiene características de corriente directa y por una célula solar el resultado es neto de dos componentes internas de corriente que se oponen. Estas son la Corriente de iluminación, debida a la generación de portadores que produce la iluminación y la Corriente de oscuridad, debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

1.2.2 Marco Teórico

1.2.2.1 Inclinación de los paneles solares

Como fue mencionado en el capítulo introductorio para optimizar el rendimiento de los paneles solares, estos deben estar inclinados con un grado de ángulo óptimo para captar los rayos del sol de manera perpendicular, de igual forma pasa con las células ya que estas son el componente de los paneles. Una inclinación equivocada podría causar una pérdida significativa de la eficiencia de todo el sistema solar.

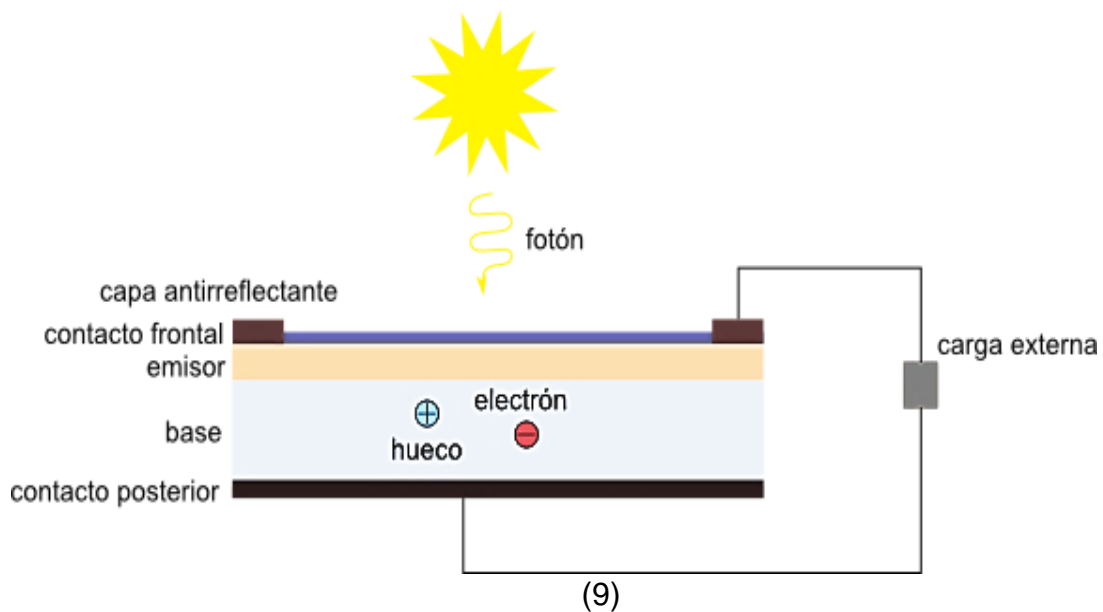
1.2.2.2 Aprovechamiento de la Energía generada

Los fotones son los que se forman, al romper el enlace entre los pares electrón-hueco y, debido al campo eléctrico producido por la unión de materiales en la célula de tipo P y N, estos se separan antes de poder recombinarse formándose así la corriente eléctrica que circula por la célula y la carga aplicada. Algunos fotones pueden no ser aprovechados para la creación de energía eléctrica por diferentes razones:

1. Los fotones que tienen energía inferior al ancho de banda prohibida del semiconductor atraviesan el semiconductor sin ceder su energía para crear pares electrón-hueco.

2. Aunque un fotón tenga una energía mayor o igual al ancho de banda prohibida puede no ser aprovechado ya que una célula no tiene la capacidad de absorberlos a todos.
3. Además, los fotones pueden ser reflejados en la superficie de la célula.

Ilustración 25. Célula Fotovoltaica bajo Carga.



1.2.2.3 Tecnología de la Célula Fotovoltaica

El silicio es el material semiconductor con que están compuestos estos dispositivos. Las células fotovoltaicas pueden variar su rendimiento de operación dependiendo la tecnología de construcción. La siguiente tabla se muestra la variedad del rendimiento de operación:

Tabla 8. Tecnología de Células FV.

Tecnología	Célula
Silicio Cristalino	22%
Silicio Multicristalino	18%
Capa delgada de Silicio	17%
Película delgada de Silicio Amorfo	13%

(11)

1.2.3 Desarrollo Experimental

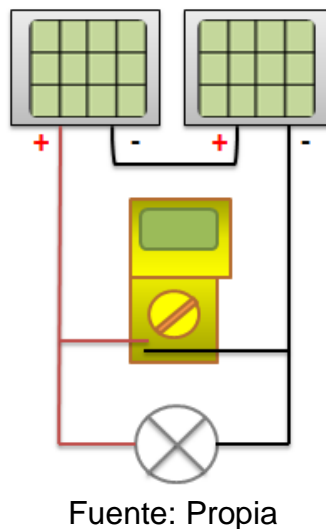
Para el desarrollo de ésta experiencia se requieren los conocimientos teóricos de la práctica anterior, *Caracterización de célula fotovoltaica*.

Se implementarán dos células conectadas en serie que operarán conectadas a una carga que demandará energía a los dispositivos captadores, con la información de la experiencia anterior se evaluarán los valores de cortocircuito y circuito abierto, con el fin de evaluar el comportamiento de los parámetros eléctricos de las células cuando trabajan bajo la carga. También se evaluarán las características en diferentes grados de inclinación de las células y como afectan su rendimiento operacional.

1.2.3.1 Medida de los Parámetros que definen el funcionamiento de dos Células Solares Fotovoltaicas a diferentes grados de inclinación

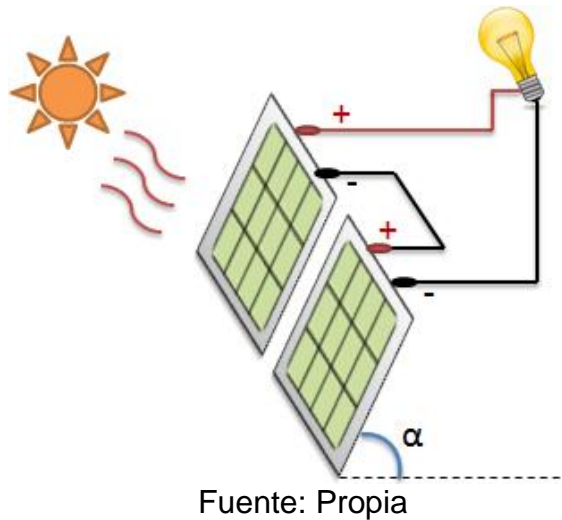
Se realizan las mediciones de los parámetros operacionales en tres casos, vacío, cortocircuito y bajo carga. Para todos los casos las mediciones se hacen siguiendo las conexiones descritas en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 26. Esquema de conexiones. Se tomaran el valor medido de la Tensión de Circuito abierto, V_{oc} y medición de la Corriente de Cortocircuito, I_{cc} .



Se tomarán los datos en ángulos de inclinación (α) diferentes, 0° , 30° , 60° , 90° , para comparación de los rendimientos.

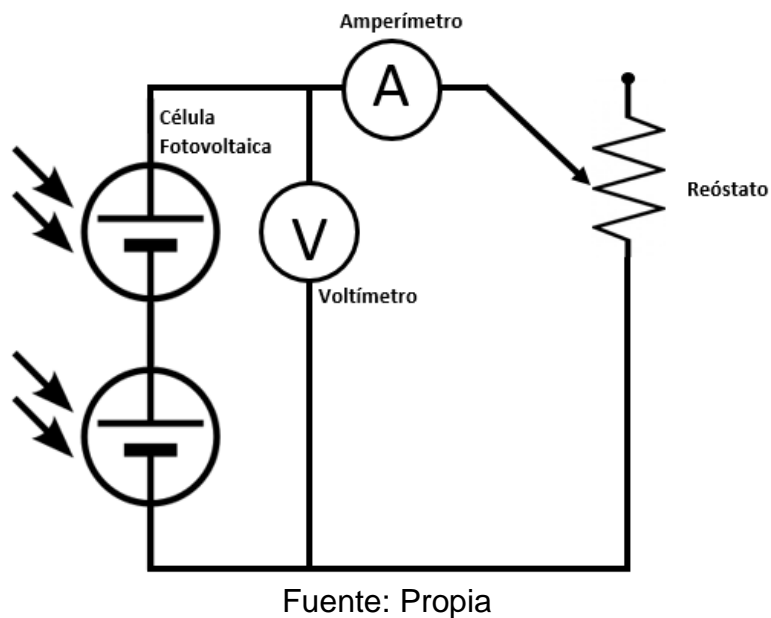
Ilustración 27. Conexión de las células inclinadas a un ángulo α bajo carga.



Fuente: Propia

Se conectarán las células FV en serie y a su vez a ellas como carga el reóstato del módulo de Lorenzo a un valor de $0,1\Omega$. A continuación se describe el diagrama de conexión en la siguiente ilustración:

Ilustración 28. Diagrama de conexión para el desarrollo de la experiencia Tomando el reóstato como la carga de 0.1Ω .



Fuente: Propia

1.2.4 Materiales para el desarrollo de la práctica

1.2.4.1 Ensayo iluminación Artificial

- ✓ 1 Célula Solar FV de 0.5V @2A
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ Polímetro con medición de Temperatura.
- ✓ 1 Flexo regulable (O con un Variac en su defecto) de 0 a 110V
- ✓ 2 Conectores caimanes 60 -70 cm
- ✓ 1 Resistencia de 0.1Ω @22W
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ 1 Lámpara PAR-38 de PHILIPS de 110V@100W
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)
- ✓ Transportador de Ángulos

1.2.4.2 Ensayo Luz Natural

- ✓ 1 Célula Solar FV de 0.5V @2A
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ Polímetro con medición de Temperatura.
- ✓ 2 Conectores caimanes 60 -70 cm
- ✓ 1 Resistencia de 0.1Ω @2W
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)
- ✓ Transportador de Ángulos.

1.2.5 Resultados

Con base a los datos obtenidos en la tabla de resultados de medición, se determinarán los parámetros, se utilizarán los datos para realizar el cálculo del rendimiento y el Factor de Forma en cada caso por ángulo de inclinación, por esto se podrá efectuar una comparación en la tabla 8 de rendimiento operacional para determinar el material de las células FV.

1.2.5.1 Resultados de la medición obtenida en el ensayo de Luz Artificial:

Tabla 9. Medidas del ensayo de iluminación artificial.

Hora	Medición Célula	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Inclinación [°]	Potencia [W]	Rendimiento [%]
:	Vacío					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:	Cortocircuito					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:	Carga R=0.1Ω					0		
:						30		
:						60		
:						90		

Fuente: Propia

1.2.5.2 Resultados de la medición obtenida obtenidos en el ensayo de Luz Natural:

Tabla 10. Medidas del ensayo de Luz natural.

Hora	Medición Célula	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Inclinación [°]	Potencia [W]	Rendimiento [%]
:	Vacío					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:	Cortocircuito					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:	Carga R=0.1Ω					0		
:						30		
:						60		
:						90		

Fuente: Propia

1.2.6 Análisis de Resultados Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos realizar el análisis de los rendimientos operacionales a diferentes ángulos evaluados, y del factor de forma de los distintos casos. Comparar el máximo valor de rendimiento obtenido con el valor de la tabla de tecnología de células fotovoltaicas para determinar el material del semiconductor que componen a los dispositivos captadores.

Análisis:

1.3 CONEXIÓN SERIE, PARALELO Y MIXTO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

1.3.1 Introducción

Las células solares son dispositivos que se pueden interconectar como todo elemento eléctrico que hace parte de un circuito cerrado, éstas disponen de dos tipos de conexiones básicas, paralela y en serie, lo cual determinará los valores eléctricos que disponga toda la instalación, aunque existe la posibilidad de combinar dichas disposiciones elementales para crear circuitos de conexiones mixtas.

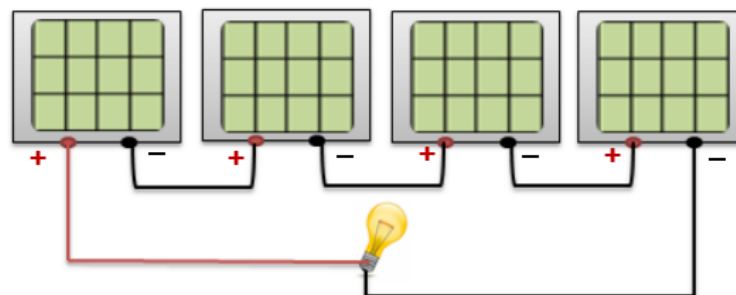
Las características de la disposición del circuito de las células determinarán las variables de la tensión como la intensidad total del sistema, variarán según el tipo de conexión, pero en cambio, la potencia nominal siempre es la misma. Ésta potencia nominal o vatios pico, es decir, la potencia que los recolectores fotovoltaicos se generará cuando las células sean sometidas a la radiación máxima.

1.3.2 Marco Teórico

1.3.2.1 Conexión Serie de Células Fotovoltaicas

Cuando se requiere elevar los niveles de tensión de células con iguales características (parámetros y curvas de operación) interconectadas, éstas se deben disponer en conexión serie. Uniendo el polo positivo de una con el negativo de la siguiente como resultado se obtendrá una tensión que será la suma de las tensiones de las células conectadas, la corriente del conjunto será por otro lado la de cualquiera de las células FV. Se ilustra el esquema de conexión:

Ilustración 29. Células en conexión Serie.

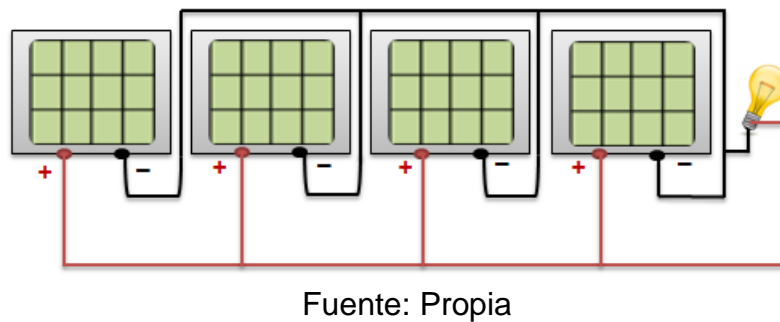


Fuente: Propia

1.3.2.2 Conexión Paralela de Células Fotovoltaicas

Pero si lo que es requerido es elevar la intensidad se realiza la conexión paralela de las células, uniando los polos positivos de todas a un conductor y los negativos a otro. La tensión obtenida es la misma para el conjunto y la corriente será la suma de la intensidad que circula por cada una de ellas. Se ilustra el esquema de conexión:

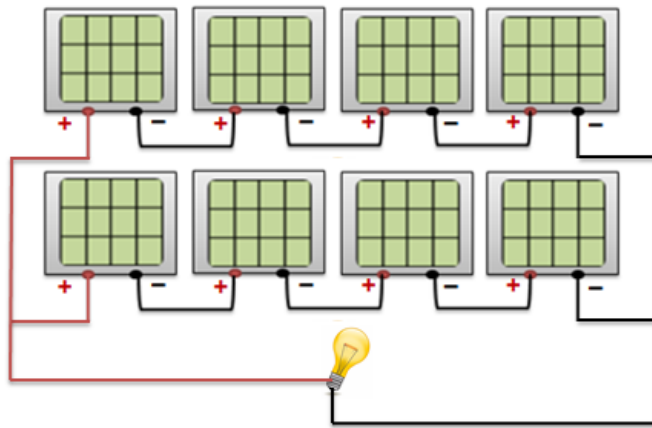
Ilustración 30. Células en conexión Paralelo.



1.3.2.3 Conexión Mixta de Células Fotovoltaicas

Si se realiza una conexión en paralelo de conjuntos de células en serie, se obtiene una disposición mixta. El conjunto de conexión mixto serie-paralelo, es utilizado para condicionar al circuito de células fotovoltaicas a una tensión e intensidad requerida por el diseñador. Se ilustra el esquema de conexión:

Ilustración 31. Células en conexión Mixta Serie-Paralelo.



Fuente: Propia

1.3.3 Desarrollo Experimental

Para el desarrollo de esta experiencia se requiere el conocimiento de las practicas Caracterización de Célula Fotovoltaica y Parámetros de Células Fotovoltaicas. Se realizarán tres ensayos, uno de cada tipo de configuración de conexión, para los cuales se deben realizar mediciones de vacío, cortocircuito y con una lámpara como carga.

1.3.3.1 Ensayo de la Conexión de cuatro células fotovoltaicas en serie

Se realiza una conexión Serie de cuatro células siguiendo el esquema descrito en la ilustración 32. El ensayo se realiza en vacío (Sin carga) y nuevamente con carga (lámpara). Verificar el cumplimiento de las fórmulas electrotécnicas descritas en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 3. Fuerza Electromotriz total generada.

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

Ecuación 4. Tensión Total.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

Ecuación 5. Intensidad Total.

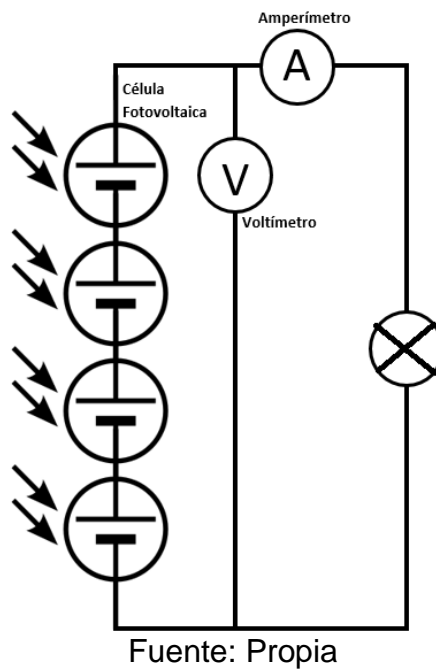
$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = I_4$$

Ecuación 6. Potencia Total.

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Tomar las mediciones, realizar cálculos para verificar el cumplimiento electrotécnico, y llevar valores obtenidos a la tabla 11, de valores obtenidos.

Ilustración 32. Esquema de conexión en serie.

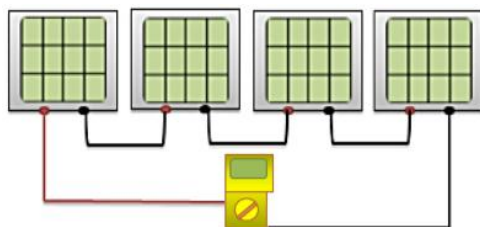


Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. Los esquemas de conexión se describen en la ilustración 33.

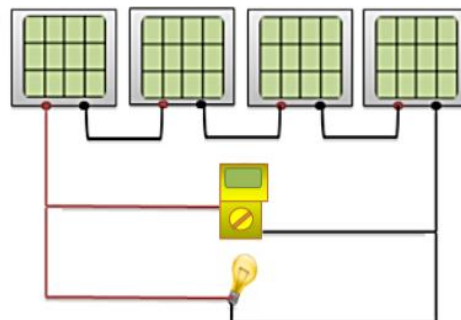
- ✓ Ensayo de Vacío - Tensión de Circuito abierto, V_{oc} .
- ✓ Ensayo de Cortocircuito - Corriente de Cortocircuito, I_{cc} .

Ilustración 33. Esquema de conexión para desarrollo del ensayo

Ensayo Sin Cargas



Ensayo con Carga



Fuente: Propia

1.3.3.2 Ensayo de la Conexión de cuatro células fotovoltaicas en paralelo

Se realiza una conexión paralela de cuatro células siguiendo el esquema descrito en la ilustración 34. El ensayo se realiza en vacío (Sin carga) y nuevamente con cargas (dos lámparas). Verificar el cumplimiento de las fórmulas electrotécnicas descritas en las siguientes ecuaciones:

Ecuación 7. Fuerza Electromotriz total generada.

$$E_T = E_1 = E_2 = E_3 = E_4$$

Ecuación 8. Tensión Total.

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 = V_4$$

Ecuación 9. Intensidad Total.

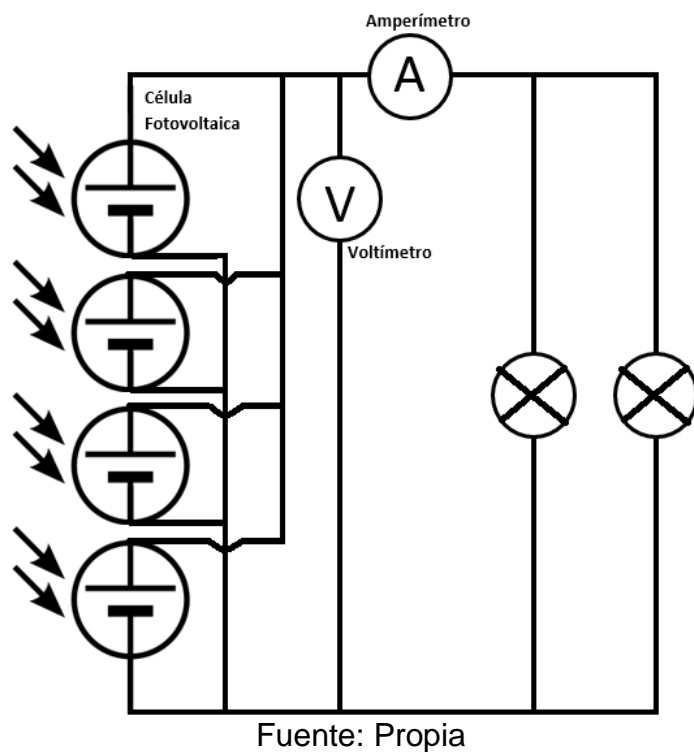
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

Ecuación 10. Potencia Total.

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Tomar las mediciones de vacío y cortocircuito, realizar cálculos para verificar el cumplimiento electrotécnico, y llevar valores obtenidos a la tabla 12, de valores obtenidos.

Ilustración 34. Esquema de conexión en paralelo.



Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. Los esquemas de conexión se describen en la ilustración 35 (sin carga) y en la ilustración 36 (con cargas).

- ✓ Ensayo de Vacío - Tensión de Circuito abierto, V_{oc}
- ✓ Ensayo de Cortocircuito - Corriente de Cortocircuito, I_{cc} .

Ilustración 35. Ensayo Sin Cargas

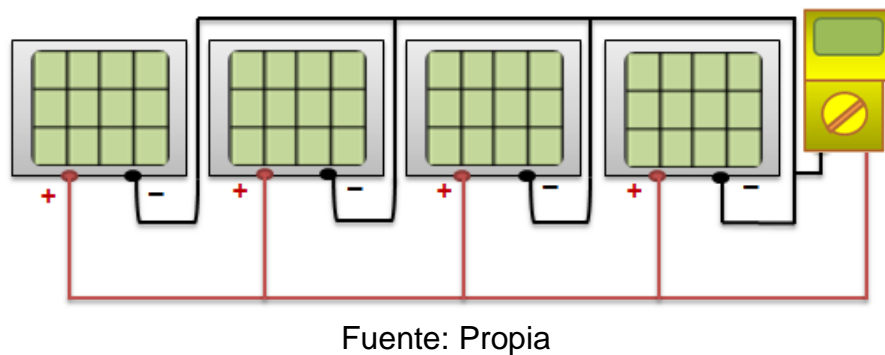
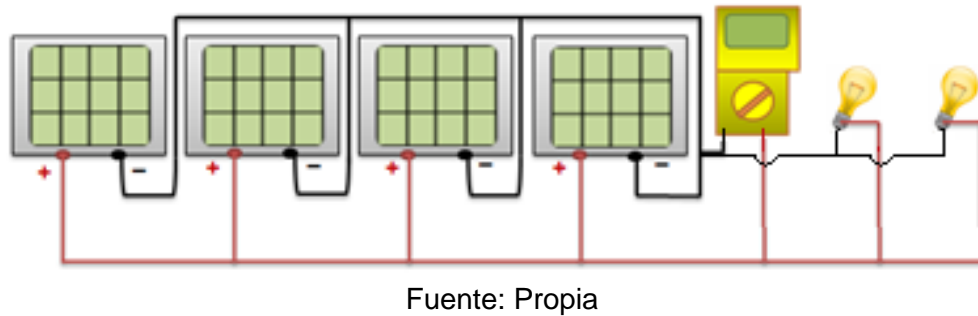


Ilustración 36. Esquema de ensayo con las Cargas.



1.3.3.3 Ensayo de la Conexión de ocho células fotovoltaicas en circuito mixto

Se realiza una conexión mixta de ocho células (2 ramas en paralelo de 4 células en serie), siguiendo el esquema descrito en la ilustración 37. El ensayo se realiza en vacío (Sin carga) y nuevamente con cargas (dos lámparas). Verificar el cumplimiento de las fórmulas electrotécnicas descritas en las siguientes ecuaciones:

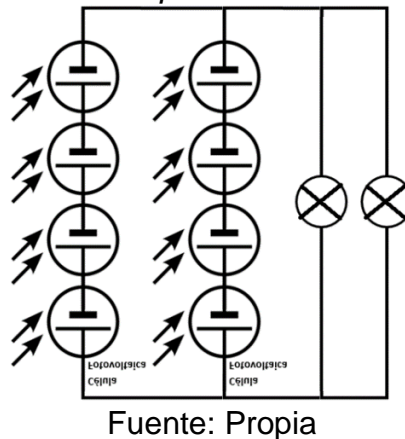
Ecuación 11. Tensión Total.

$$V_T = \text{Voltaje de una Célula} * \text{Número de Células de una rama}$$

Ecuación 12. Intensidad Total.

$$I_T = \text{Intensidad de una Rama} * \text{Número de Ramas}$$

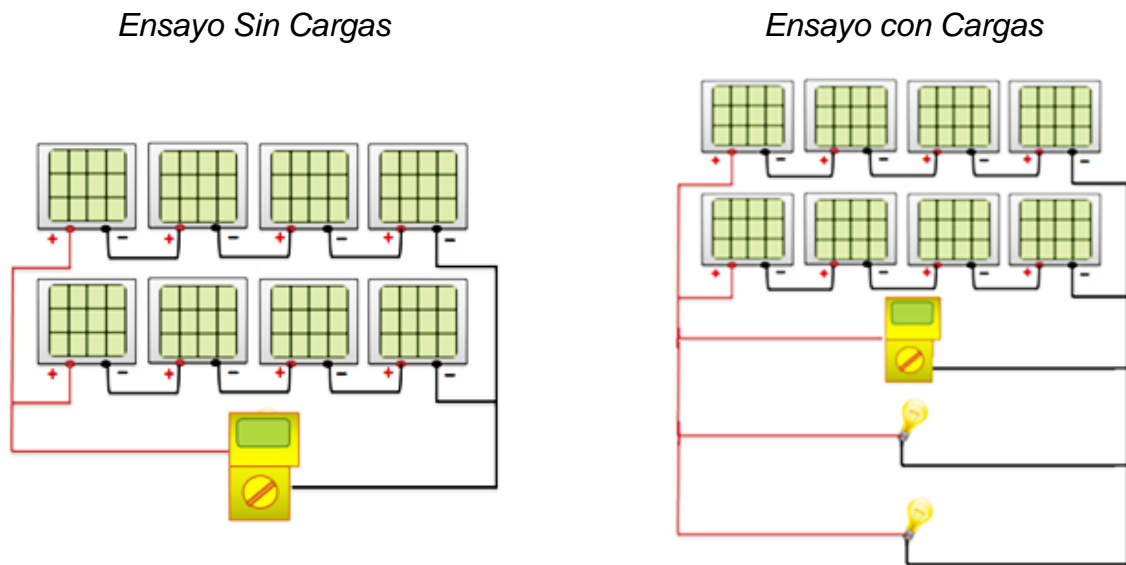
Ilustración 37. Esquema de conexión mixta.



Tomar las mediciones de vacío y cortocircuito, realizar cálculos para verificar el cumplimiento electrotécnico, y llevar valores obtenidos a la tabla 13, de valores obtenidos. Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. Los esquemas de conexión se describen en la ilustración 38.

- ✓ Ensayo de Vacío - Tensión de Circuito abierto, V_{oc} .
- ✓ Ensayo de Cortocircuito - Corriente de Cortocircuito, I_{cc} .

Ilustración 38. Esquema de conexión para desarrollo del ensayo.



Fuente: Propia

1.3.4 Materiales para el desarrollo de la práctica

- ✓ 8 Células Solares FV de 0.5V, 2A, 1W cada una.
- ✓ 2 Lámparas 1.2V y 0.3W cada una, Con Portalámparas.
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ 2 Conectores caimanes 30 -50 cm
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)

1.3.5 Resultados

1.3.5.1 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión de cuatro células solares fotovoltaicas en serie.

Tabla 11. Medidas del ensayo en serie.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [Lámpara]					

Fuente: Propia

1.3.5.2 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión de cuatro células solares fotovoltaicas en paralelo.

Tabla 12. Medidas del ensayo en paralelo.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [Lámparas]					

Fuente: Propia

1.3.5.3 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión de ocho células solares fotovoltaicas en circuito mixto.

Tabla 13. Medidas del ensayo en circuito mixto.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [Lámparas]					

Fuente: Propia

1.3.6 Análisis de Resultados Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos realizar el análisis operacional de cada disposición, mencionar las características y comprobar el cumplimiento de las formulas electrotécnicas del comportamiento de las variables de Tensión y Corriente de los circuitos serie, paralelo y mixto. Determinar las ventajas y desventajas que presenta la utilización de cada circuito.

Análisis:

2 CAPÍTULO 2: PANELES FOTOVOLTAICOS

2.1 MEDICIÓN DE CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS.

2.1.1 Introducción

La aparición de la tecnología fotovoltaica aplicada tuvo inicios en la industria aeroespacial, a través de la implementación de los Paneles Fotovoltaicos se convertiría en el medio más favorable de suministrar energía eléctrica a un satélite fuera de órbita terrestre. La mayor irradiación solar sin el impedimento de la atmósfera y a su alta relación potencia a peso hacen posible el óptimo funcionamiento de estos dispositivos.

El aumento de la demanda de energías de fuentes renovables, conllevó a la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas y ha avanzado esta tecnología considerablemente en los últimos años. Los paneles, los cuales se componen de células interconectadas, son aplicados para alimentar innumerables equipos eléctricos, como claro ejemplo el abastecimiento de casas aisladas de la red interconectada eléctrica y la producción de electricidad a gran escala a través de redes de distribución.

Ilustración 39. Ejemplar de un Panel Fotovoltaico tipo cristalino.



(13)

Favoreciendo a evitar la emisión de una mayor cantidad de gases de efecto invernadero, programas de incentivos económicos, con sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios, han apoyado la instalación de la tecnología fotovoltaica en un gran número de países.

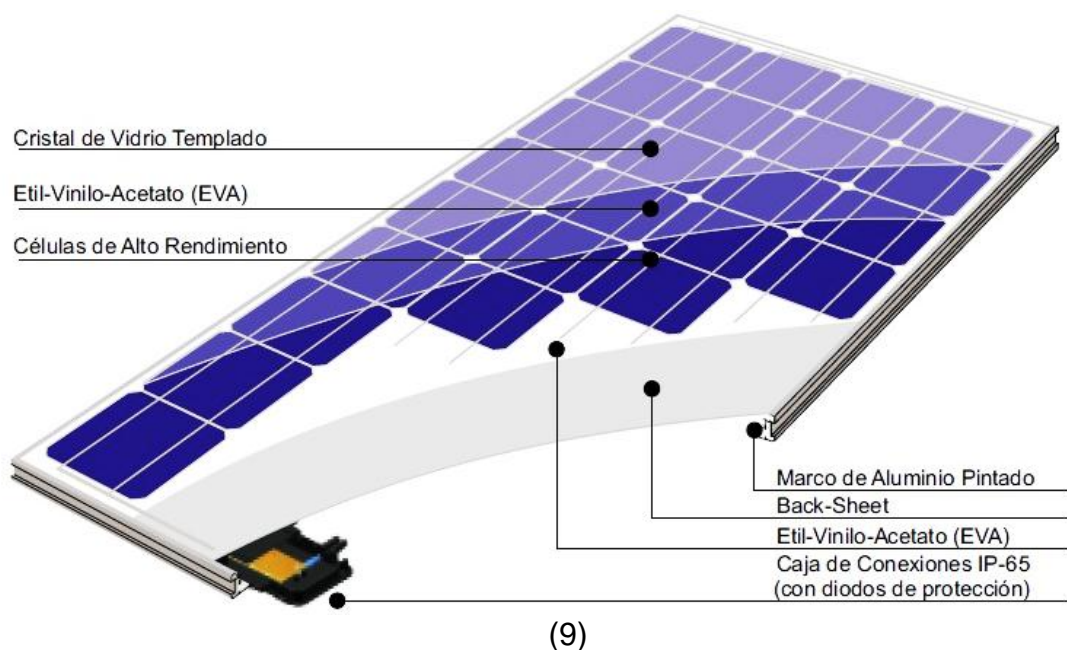
La potencia de un panel fotovoltaico se mide en Watt peak, vatio pico [Wp], respectivamente en kWp o MWp. Se trata de la potencia eléctrica generada en condiciones estándares para la incidencia de luz. A finales de 2013 había instalados en el mundo aproximadamente 96,5 GW de energía solar fotovoltaica, según un informe dado a conocer por la Agencia Internacional de la Energía. (8)

2.1.2 Marco Teórico

2.1.2.1 Paneles Fotovoltaicos

Los Paneles solares de tecnología fotovoltaica, también denominados Módulos, son un conjunto interconectado eléctricamente de células fotovoltaicas dentro de un marco de aluminio con hojas de polímetro y una cubierta frontal de vidrio templado que protege la disposición de las células colectoras que lo componen contra la intemperie. Por lo general son de fácil transportar e instalar, al no tener partes móviles se caracterizan por que requieren de un mantenimiento mínimo, más su durabilidad y alta confiabilidad de operación permiten al fabricante otorgar una garantía por defectos de dispositivo y reducción de eficiencia de un promedio hasta de 25 años. En el actual mercado se encuentran paneles de 10W a 300W de generación, siendo un valor comercial el modelo de 50W de potencia nominal.

Ilustración 40. Estructura general de un Panel Fotovoltaico.



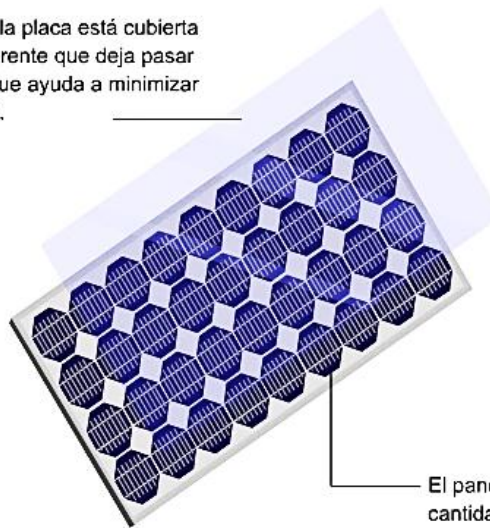
Las células fotovoltaicas que componen los paneles se pueden presentar de tres formas cristalinas.

- Monocristalinas: Se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si) (reconocibles por su forma circular u octogonal, donde los 4 lados cortos, si se puede apreciar en la imagen, se aprecia que son curvos, debido a que es una célula circular recortada).
- Policristalinas: Cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
- Amorfas: Cuando el silicio no se ha cristalizado.

Su efectividad es mayor en cuantos mayores son los cristales, pero también su peso, grosor y costo. El rendimiento de las primeras puede alcanzar el 20% mientras que el de las últimas puede no llegar al 10%, sin embargo su costo y peso son muy inferiores. (14)

Ilustración 41. Composición de un panel solar de células monocristalinas.

La parte superior de la placa está cubierta con un vidrio transparente que deja pasar la radiación solar y que ayuda a minimizar las pérdidas de calor.

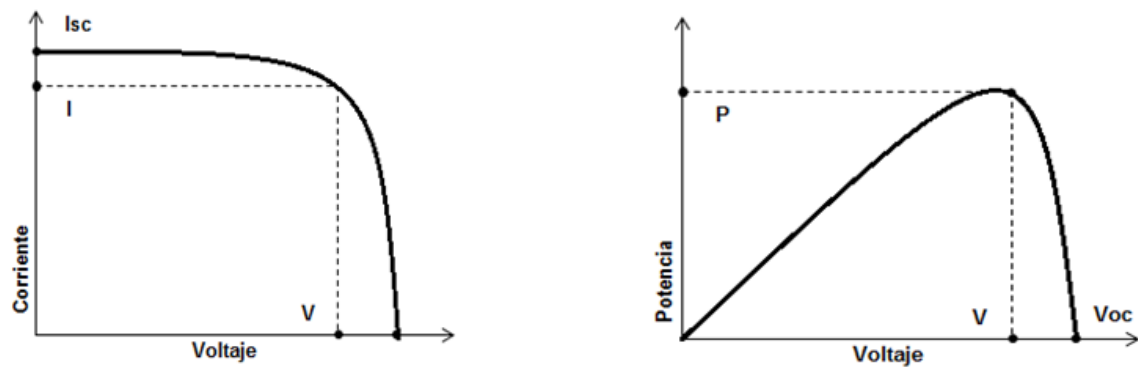


El panel es formado por una cantidad determinada de células fotovoltaicas cuyo número dependerá del voltaje requerido.

(9)

Eléctricamente las características de operación de los paneles fotovoltaicos están dadas por la curva de comportamiento de corriente producida en un rango de voltaje generación (I-V), comportamiento que corresponde a la disposición de sus células interconectadas. Para que se considere eficiente la potencia de entrega, el panel FV debe operar a un voltaje óptimo, puesto si no la potencia se reducirá.

Ilustración 42. Curvas I-V (izquierda) y P-V (derecha) operacional de Célula FV.



Fuente: Propia

El parámetro estandarizado para caracterizar la potencia de un panel fotovoltaico es la Potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- Radiación solar de 1000 W/m² ó 1KW/ m²
- Temperatura de operación de células de 25 °C, no es la temperatura ambiente.

En el caso de los sistemas fotovoltaicos independientes el nivel de voltaje de la batería, determinara el voltaje de operación en que operara el panel. El **Punto de máxima potencia** (P_M) es el producto del valor de tensión máxima (V_M) e intensidad máxima (I_M) para los que la potencia entregada a una carga es máxima.

El Factor de forma [FF]: Se define como el cociente de potencia máxima que se puede entregar a una carga entre el producto de la tensión de circuito abierto y la intensidad de cortocircuito. Se halla mediante la siguiente ecuación:

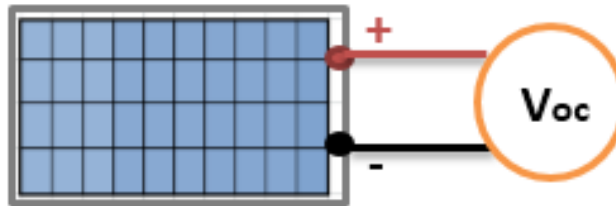
Ecuación 13. Factor de Forma.

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$$

Dentro de los parámetros que determinan el funcionamiento de estos dispositivos esta la corriente de cortocircuito (I_{cc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). (12)

Tensión de Circuito Abierto [Voc]: Es el máximo valor de tensión en extremos del panel y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga. A la hora de realizar la medición se debe tener en cuenta las polaridades. La medida de tensión a circuito abierto en la siguiente ilustración:

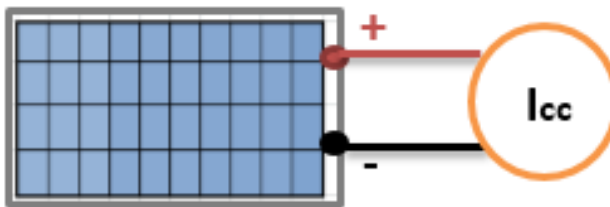
Ilustración 43. Medición de Tensión de Circuito Abierto.



Fuente: Propia

Corriente de Cortocircuito [Icc]: Es el máximo valor de corriente que circula por una célula fotovoltaica y se da cuando la célula está en cortocircuito. La medida de esta característica se esquematiza en la siguiente ilustración:

Ilustración 44. Medición Corriente de Cortocircuito.



Fuente: Propia

Eficiencia o rendimiento: Se define como el cociente entre la máxima potencia eléctrica que se puede entregar a la carga (P_M) y la Irradiancia incidente (P_L) sobre la célula que es el producto de la irradiancia incidente por el área de la célula. A continuación la ecuación de eficiencia operacional:

Ecuación 14. Rendimiento.

$$\eta = \frac{P_M}{P_L} = \frac{I_M \cdot V_M}{P_L}$$

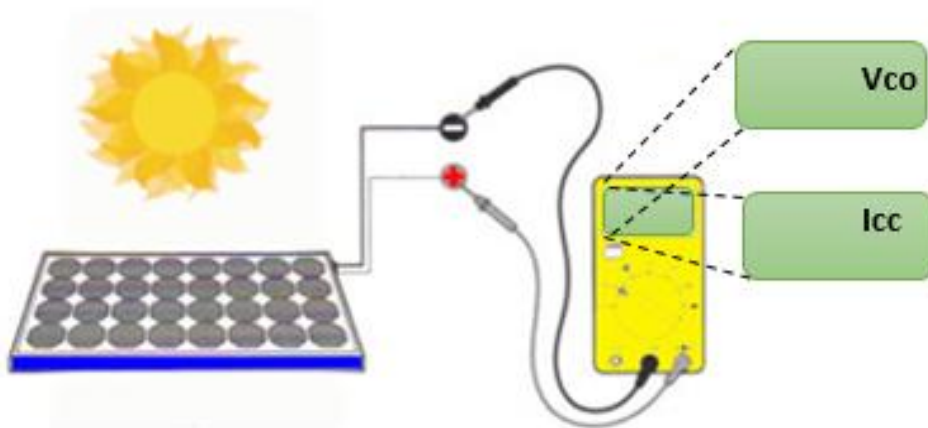
2.1.3 Desarrollo Experimental

Para el desarrollo de esta experiencia se requiere tener claro los conceptos de la práctica de Caracterización de células fotovoltaicas, ya que tienen el mismo principio operacional, se debe aplicar los temimos para paneles fotovoltaicos.

2.1.3.1 Ensayo de Medición de Variables Fundamentales

Determinar el funcionamiento de una célula fotovoltaica por medio de la medición de los parámetros de corriente de cortocircuito (I_{cc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{co}). Para realizar las mediciones de los ensayos de vacío y cortocircuito seguir la descripción de la siguiente ilustración:

Ilustración 45. Esquema de medida para ensayo de circuito abierto y cortocircuito.

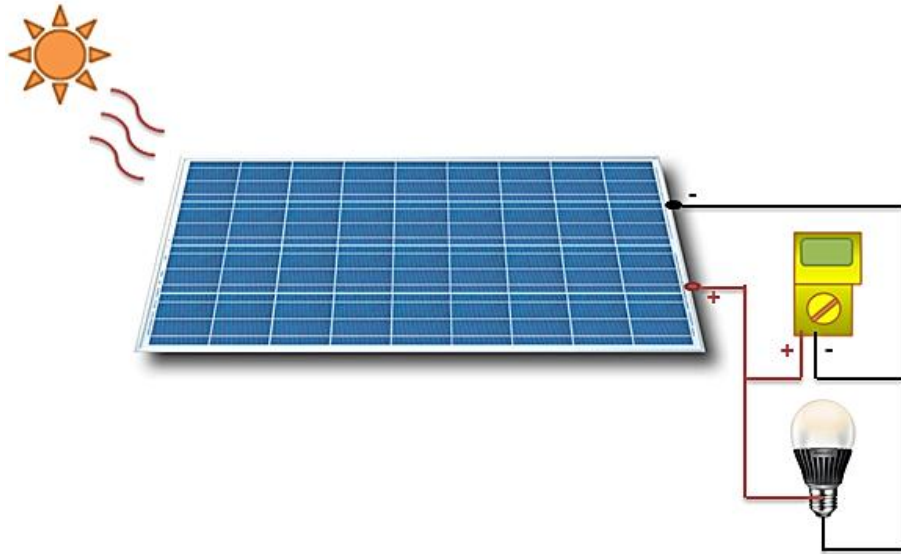


Fuente: Propia

2.1.3.2 Ensayo de Medición de Variables En Carga

Se empleara como carga una lámpara de 60W a 24V. Las medidas de corriente y tensión estarán dadas por la medición del multímetro y la potencia generada será del producto estas dos variables ($P=V \cdot I$). El siguiente es el esquema de conexión para el ensayo, se realizara en el exterior (luz natural):

Ilustración 46. Conexiones para el desarrollo de la experiencia.

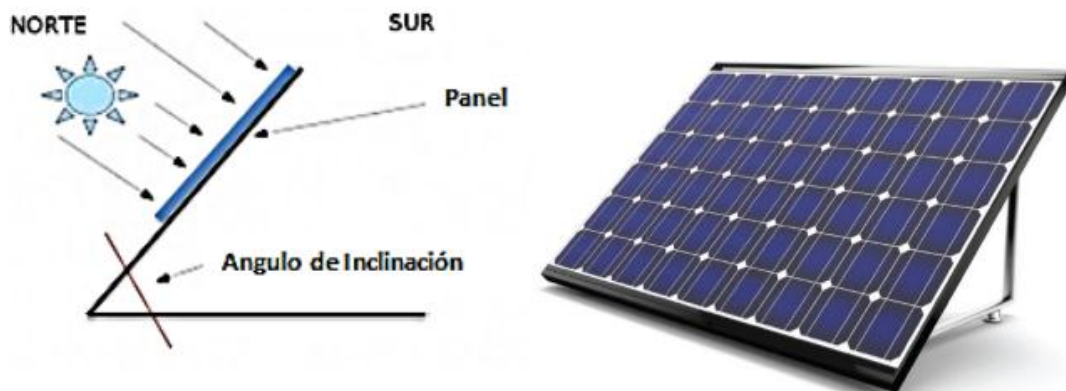


Fuente: Propia

2.1.3.3 Orientación Geográfica e Inclinação Óptima

La orientación de los paneles depende de la ubicación geográfica del sitio donde se instale. La experiencia se realizará en el hemisferio sur por lo que el panel se orientará hacia el norte.

Ilustración 47. Orientación hacia el norte del panel.



(15)

Para la orientación se requiere utilizar la brújula. Las variaciones del ángulo tienen una orientación de $\pm 5^\circ$ de inclinación que no influirá en la generación de potencia. Para el desarrollo de la experiencia se usara un ángulos de inclinación de 0° , 30° , 60° y 90° ; con la orientación al norte evaluar los rendimientos operacionales del panel.

2.1.4 Materiales para el desarrollo de la práctica

- ✓ 1 Panel Solar FV de 88W
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ 4 Conectores bananas de 60-70cm de longitud
- ✓ 1 Lámpara de 40W/24V
- ✓ 1 Soporte para lámpara
- ✓ 1 Voltímetro (escala 50V C.C.)
- ✓ 1 Amperímetro (escala 10^a C.C.)
- ✓ 1 Transportador de Angulo
- ✓ 1 Brújula.

2.1.5 Resultados

Con base a los datos obtenidos llenar la tabla de resultados de medición. Con las variables se determinan los parámetros operacionales del panel fotovoltaico en los diferentes ángulos de inclinación, los que se utilizarán para realizar el cálculo del rendimiento y el Factor de forma de cada caso. Realizar las Gráficas de relación de parámetros, curvas de Corriente-Voltaje y de Potencia-Voltaje.

2.1.5.1 Mediciones de parámetros fundamentales:

Ilustración 48. Datos del ensayo del ensayo al panel FV.

Hora	Medición Célula	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Inclinación [°]	Potencia [W]	Rendimiento [%]
:	Vacío [V _{co}]					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:	Cortocircuito [I _{cc}]					0		
:						30		
:						60		
:						90		
:	Carga [Lámpara]					0		
:						30		
:						60		
:						90		

Fuente: Propia

2.1.6 Análisis de Resultados Conclusiones

Con los resultados obtenidos realizar el análisis operacional del panel fotovoltaico caracterizado, entregar conclusiones del comportamiento de los parámetros graficados teniendo en cuenta el rendimiento por cada caso de ángulo de inclinación.

Análisis:

2.2 CONEXIONES ELÉCTRICAS DE PANELES FOTOVOLTAICO

2.2.1 Introducción

Los paneles fotovoltaicos están diseñados para formar una disposición modular, es decir, para poder conectar varias unidades de éstos dispositivos colectores de energía solar en un sistema operacional.

Las interconexiones eléctricas de paneles solares, tiene el mismo principio operacional de las células de tecnología fotovoltaica que los componen. La unión de varios paneles como circuito de trabajo permite a su vez que se puedan combinar sus variables eléctricas para formar estructuras mayores; de esta forma son denominados los Arreglos Fotovoltaicos. Entre sí estos arreglos de paneles solares se disponen en conexiones serie o paralela para poder obtener la tensión adecuada para la aplicación que se haga requerida, inclusive se pueden realizar configuraciones mixtas de grupos de paneles en conexión serie que se interconecten a otros grupos en conexión paralela y viceversa para obtener las variables eléctricas de generación de energía requeridas por el sistema a suministrar.

Es de mucha importancia que al diseñar un sistema interconectado de varios paneles, que estos sean del mismo modelo referente, es decir, sus parámetros fundamentales de placa sean los mismos o al menos tengan características eléctricas parecidas, en caso de no ser de la mismo fabricante.

Aunque la tensión de las baterías puede determinar la tensión del campo de paneles, hoy en día es muy común el uso de reguladores MPPT (reguladores de optimización de eficiencia de paneles o módulos fotovoltaicos), que nos permiten, entre otras cosas, independizar el voltaje de las baterías del voltaje de los paneles. Por ejemplo podemos tener baterías a 12V y utilizar paneles a 24V, con lo que podemos ahorrar en el cableado de la instalación.

2.2.2 Marco Teórico

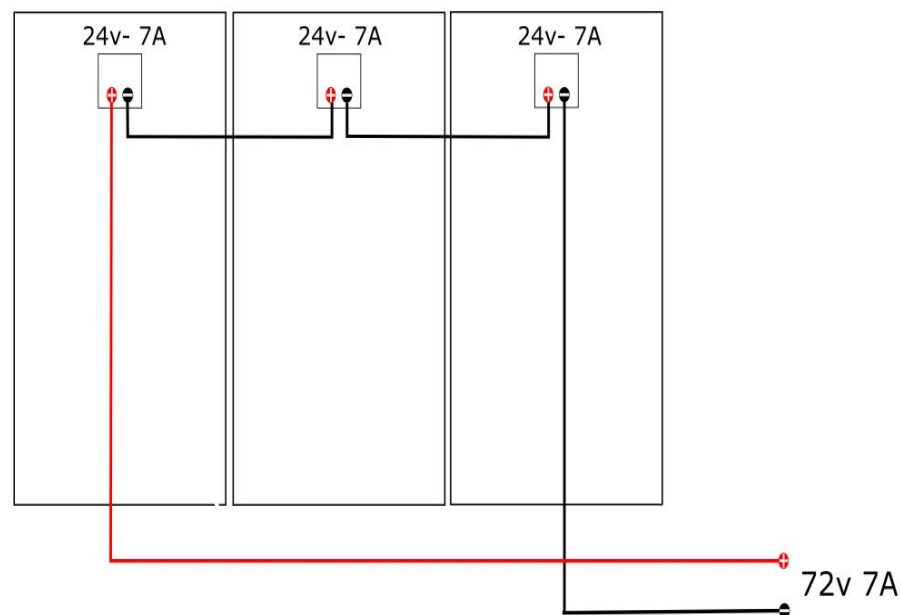
2.2.2.1 Conexión Serie de Paneles Fotovoltaicas

Uniando el polo positivo de un Panel con el negativo de otro consiguiente como resultado se obtendrá una tensión que será la suma de las tensiones de éstos dispositivos interconectados, la corriente del conjunto será por otro lado la de cualquiera de las células FV.

Cuando se requiere elevar los niveles de tensión de células con iguales características (parámetros y curvas de operación) interconectadas, éstas se deben disponer en conexión serie.

En términos generales al conectar los paneles FV en serie, sumamos el voltaje y mantenemos fija la intensidad. Como por ejemplo, 3 paneles de 24V nos darían una tensión de 72V y trabajaríamos (según el modelo del panel) con una intensidad de corriente de 7A (aproximadamente). Se ilustra a continuación:

Ilustración 49. Paneles en conexión Serie.



(16)

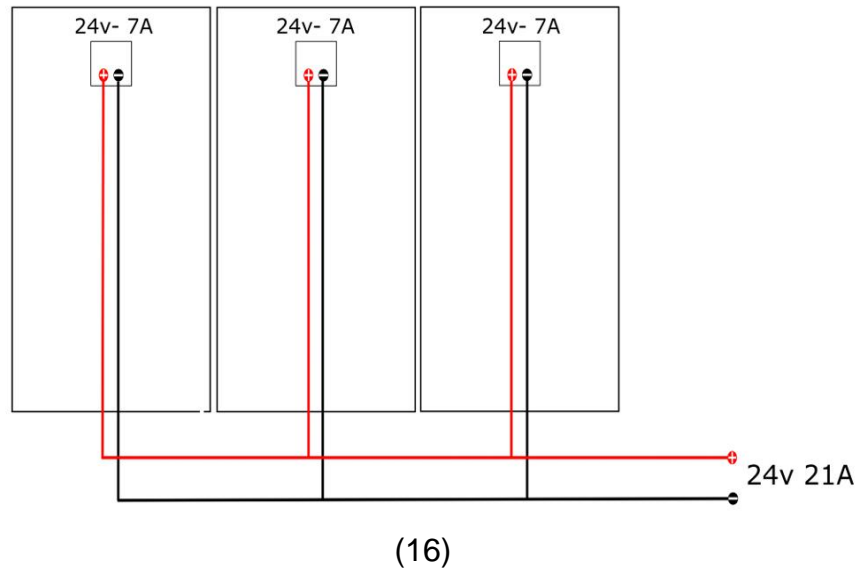
2.2.2.2 Conexión Paralela de Paneles Fotovoltaicas

Se realiza la conexión paralela de los paneles FV si es requerido elevar la corriente operacional de éstos interconectados, uniendo los polos positivos de todos a un conductor y los negativos a otro. La tensión obtenida es la misma para el conjunto y la corriente será la suma de la intensidad que circula por cada una de ellas.

Generalizando, al realizar la conexión de los paneles en paralelo, lo que estamos haciendo es mantener fijo el voltaje y sumar la intensidad de los paneles. Siguiendo el mismo ejemplo de antes, si tenemos 3 paneles de 24V en paralelo, el total sigue siendo 24V y la intensidad es la suma de las intensidades de éstos (si

estimamos 7 amperios por panel pues 21 amperios en total).Se ilustra a continuación:

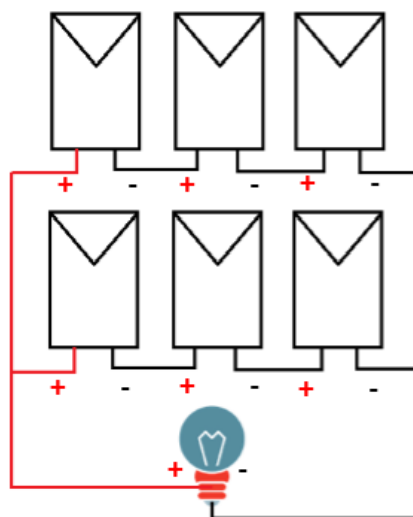
Ilustración 50. . Paneles en conexión Paralelo.



2.2.2.3 Conexión Mixta de Paneles Fotovoltaicas

Si se realiza una conexión en paralelo de conjuntos de paneles en serie, se obtiene una disposición mixta. El conjunto de conexión mixto serie-paralelo, es utilizado para condicionar al circuito de células fotovoltaicas a una tensión e intensidad requerida por el diseñador. El esquema de conexión se da como ejemplo a continuación:

Ilustración 51. Células en conexión Mixta Serie-Paralelo.



Fuente: Propia

2.2.3 Desarrollo Experimental

2.2.3.1 Ensayo de la Conexión de dos paneles fotovoltaicos en serie

Realizar una Conexión Serie de dos paneles. Seguir esquema de la ilustración 52. Verificar el cumplimiento de la fórmula electrotécnica:

Ecuación 15. Fuerza Electromotriz total generada.

$$E_T = E_1 + E_2$$

Ecuación 16. Tensión Total.

$$V_T = V_1 + V_2$$

Ecuación 17. Intensidad Total.

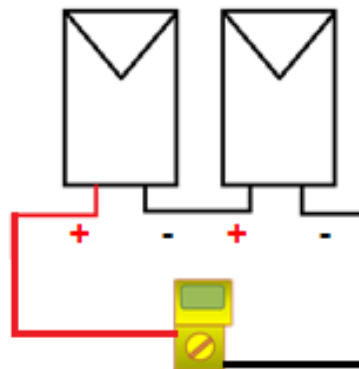
$$I_T = I_1 = I_2$$

Ecuación 18. Potencia Total.

$$P_T = P_1 + P_2$$

Tomar las mediciones de vacío y cortocircuito, realizar cálculos para verificar el cumplimiento electrotécnico, y llevar valores obtenidos a la tabla 14, de valores obtenidos. El siguiente es el esquema de conexión para la toma de medidas:

Ilustración 52. Esquema de conexión en serie.

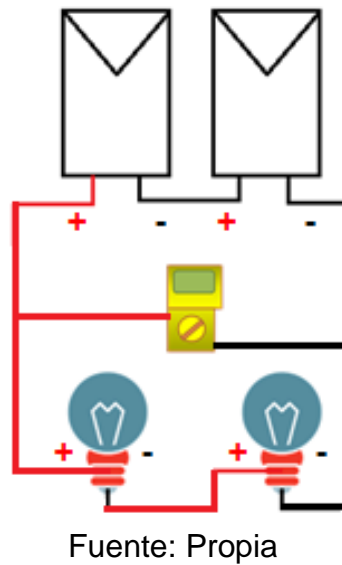


Fuente: Propia

Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. El esquema de conexión para el ensayo bajo carga se aprecia en la ilustración 53.

- ✓ Ensayo de Vacío - Tensión de Circuito abierto, Voc.
- ✓ Ensayo de Cortocircuito - Corriente de Cortocircuito, Icc.

Ilustración 53. Ensayo con Cargas en Serie.



2.2.3.2 Ensayo de la Conexión de dos paneles fotovoltaicos en paralelo

Realizar una Conexión paralela de dos paneles. Seguir esquema de la ilustración 54. Verificar el cumplimiento de la fórmula electrotécnica:

Ecuación 19. Fuerza Electromotriz total generada.

$$E_T = E_1 = E_2$$

Ecuación 20. Tensión Total.

$$V_T = V_1 = V_2$$

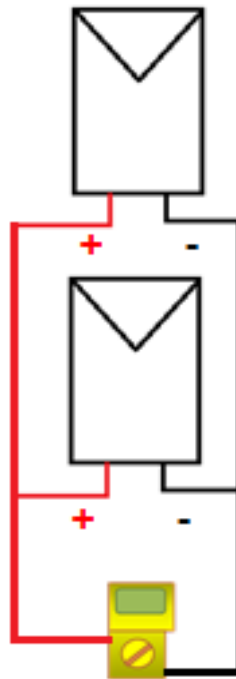
Ecuación 21. Intensidad Total.

$$I_T = I_1 + I_2$$

Ecuación 22. Potencia Total.

$$P_T = P_1 + P_2$$

Ilustración 54. Esquema de conexión en paralelo.

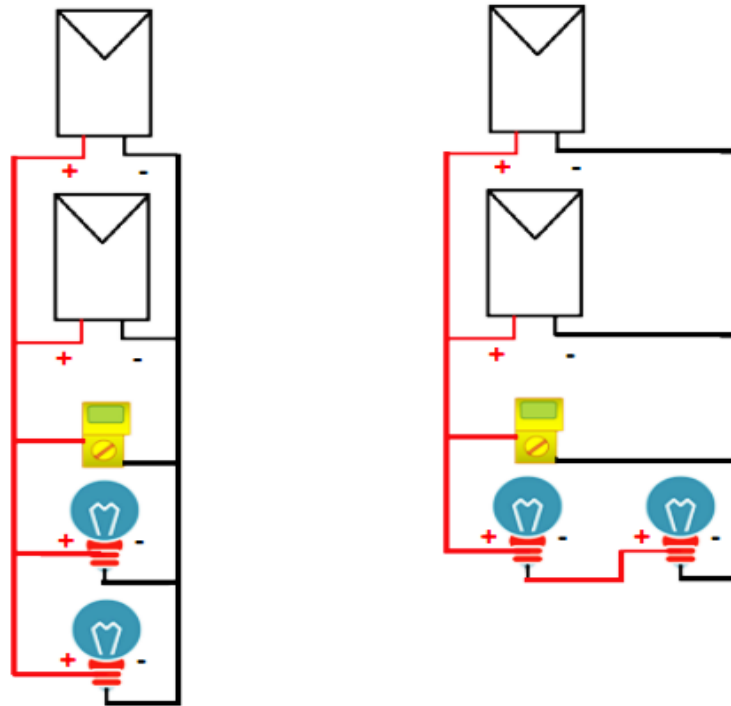


Fuente: Propia

Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. Los ensayos bajo carga se esquematizan en la ilustración 55.

- ✓ Ensayo de Vacío - Tensión de Circuito abierto, Voc.
- ✓ Ensayo de Cortocircuito - Corriente de Cortocircuito, Icc.

Ilustración 55. Esquema de ensayo con las Cargas en paralelo (izquierda) y con cargas en serie (derecha).



Fuente: Propia

2.2.3.3 Ensayo de la Conexión de dos paneles fotovoltaicos en circuito de configuración mixto.

Realizar una Conexión Mixta, serie-paralela de seis paneles en dos ramales. Verificar el cumplimiento de la fórmula electrotécnica:

Ecuación 23. Tensión Total.

$$V_T = \text{Voltaje de una Célula} * \text{Número de Células de una rama}$$

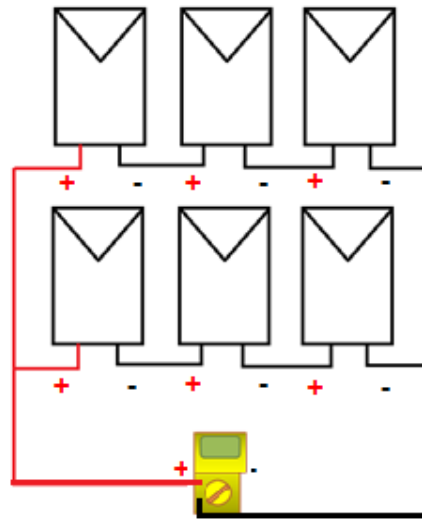
Ecuación 24. Intensidad Total.

$$I_T = \text{Intensidad de una Rama} * \text{Número de Ramas}$$

Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. Los esquemas de conexión de los ensayos se muestran en la ilustración 56 (de vacío), e ilustración 57 (ensayo con cargas).

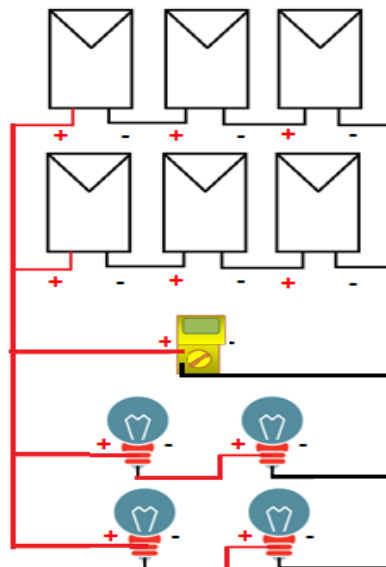
- ✓ Ensayo de Vacío - Tensión de Circuito abierto, VOC.
- ✓ Ensayo de Cortocircuito - Corriente de Cortocircuito, ISC.

Ilustración 56. Esquema de conexión mixta.



Fuente: Propia

Ilustración 57. Esquema de ensayo con las Cargas en serie-paralelo.



Fuente: Propia

2.2.4 Materiales para el desarrollo de la práctica

- ✓ 4 Paneles Solares FV de 32.4V, 4.3A, 88W cada una.
- ✓ 4 Lámparas 24V y 60W cada una.
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ 12 Conectores caimanes 60 -70 cm
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)
- ✓ 4 Porta Lámparas.

2.2.5 Resultados

2.2.5.1 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión de dos paneles solares fotovoltaicos en serie.

Tabla 14. Medidas del ensayo en serie.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [Lámparas]					

2.2.5.2 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión de dos paneles solares fotovoltaicos en paralelo.

Tabla 15. Medidas del ensayo en paralelo Cargas en Serie.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [serie]					

Fuente: Propia

Tabla 16. Medidas del ensayo en paralelo Cargas en Paralelo.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [paralelo]					

Fuente: Propia

2.2.5.3 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión de dos paneles solares fotovoltaicos en circuito mixto.

Tabla 17. Medidas del ensayo conexión serie-paralelo.

	Radiación [W/m ²]	Temperatura [°C]	Tensión [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
Vacío					
Cortocircuito					
Carga [serie-paralela]					

Fuente: Propia

2.2.6 Análisis de Resultados Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos realizar el análisis operacional de cada disposición, mencionar las características y comprobar el cumplimiento de las formulas electrotécnicas del comportamiento de las variables de Tensión y Corriente de los circuitos serie, paralelo y mixto. Determinar las ventajas y desventajas que presenta la utilización de cada circuito.

Análisis:

3 CAPÍTULO 3: SISTEMAS ELÉCTRICOS FOTOVOLTAICOS

3.1 SISTEMAS ELÉCTRICOS FOTOVOLTAICOS

3.1.1 Introducción

El funcionamiento de un Sistema Eléctrico Solar Fotovoltaico se puede describir mediante un proceso, el cual inicia con lo explicado en el primer capítulo del libro, refiriéndose éste a que el primer paso es la generación de la electricidad.

La irradiación que es captada en la luz solar que posa sobre la superficie del arreglo de los paneles fotovoltaicos dispuestos, es convertida en energía eléctrica de corriente directa por las celdas solares. El siguiente paso es la etapa de los componentes funcionales del sistema fotovoltaico. De acuerdo a los requerimientos operacionales para lo que se diseña el sistema eléctrico del sistema, y de acuerdo a las variantes de independencia aislamiento conexión a red o híbrida se pueden requerir distintos tipos de componentes principales como los son los inversores de corriente bancos de baterías controladores de bancos fuentes auxiliares y en ocasiones dispositivos electrónicos o electrodomésticos específicos.

La energía generada es recolectada y conducida hasta un controlador de carga con la función de enviar a toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías en donde es almacenada, así ésta se encarga de vigilar que no se excedan los límites de sobrecarga y sobredescarga del sistema.

La energía almacenada o enviada a la red se utiliza para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente directa, estas pueden hacerse a través del arreglo fotovoltaico o desde la batería. Cuando las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías, limitadas por el controlador, es enviada a un inversor de corriente, en donde es convertida a corriente alterna. (16)

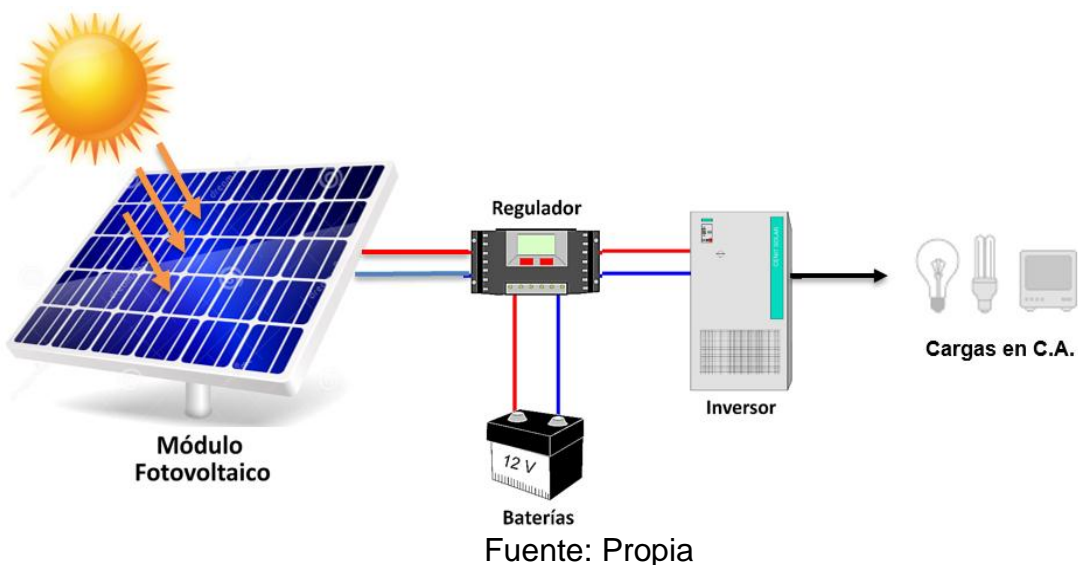
3.1.2 Marco Teórico

3.1.2.1 Componentes de los Sistema Solar Fotovoltaico

Un Sistema Solar Fotovoltaico es el conjunto de dispositivos cuya función es convertir la energía solar directamente en energía eléctrica, acondicionando esta última a los requerimientos de una aplicación determinada. Consta principalmente de los siguientes elementos:

- ✓ Arreglos de módulos de celdas solares.
- ✓ Estructura y cimientos del arreglo.
- ✓ Reguladores de voltaje y otros controles, típicamente un controlador de carga de batería, un inversor de corriente CD/CA o un rectificador CA/CD.
- ✓ Baterías de almacenamiento eléctrico y recinto para ellas.
- ✓ Instrumentos.
- ✓ Cables e interruptores.
- ✓ Red eléctrica circundante.
- ✓ Cercado de seguridad, sin incluir las cargas eléctricas.

Ilustración 58. Sistema Fotovoltaico, Componentes.



Un Sistema Solar Fotovoltaico no siempre consta de la totalidad de los elementos aquí mencionados. Puede prescindir de uno o más de éstos, dependiendo del tipo y tamaño de las cargas a alimentar, el tiempo, hora y época de operación y la naturaleza de los recursos energéticos disponibles en el lugar de la instalación. (16)

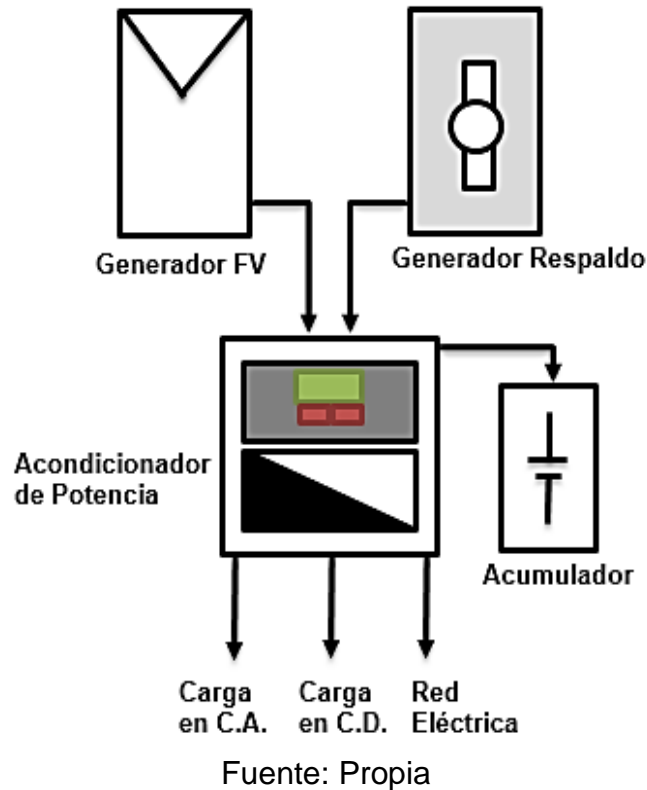
3.1.2.2 Aplicación de Sistemas Solares Fotovoltaicos

Los sistemas eléctricos de tecnología FV aprovechan la radiación solar como su fuente de recurso inextinguible, con las características de no contaminante y silenciosa, una alternativa de generación de energía limpia. Ya que el sol es la fuente natural, las instalaciones a las que se le puede aplicar el sistema fotovoltaico no cuentan con la desventaja de localizarse en cualquier punto geográfico. De esta forma se clasificarían las instalaciones aisladas de las redes eléctricas y las que se encuentran conectadas a la red de un operador de distribución.

3.1.2.3 Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Son los sistemas eléctricos fotovoltaicos que utilizan la energía producida de la conversión fotovoltaica para cubrir determinada demanda en lugares remotos, aislados de la Red, con aplicación para Telecomunicaciones, Supervisión Remota y Abastecimiento de electricidad para comunidades rurales entre otras. Es común ver en este tipo la conexión de una segunda fuente de respaldo por lo que el sistema trabajaría en forma de transferencia. (15)

Ilustración 59. Esquema general de Sistemas Solares Autónomos

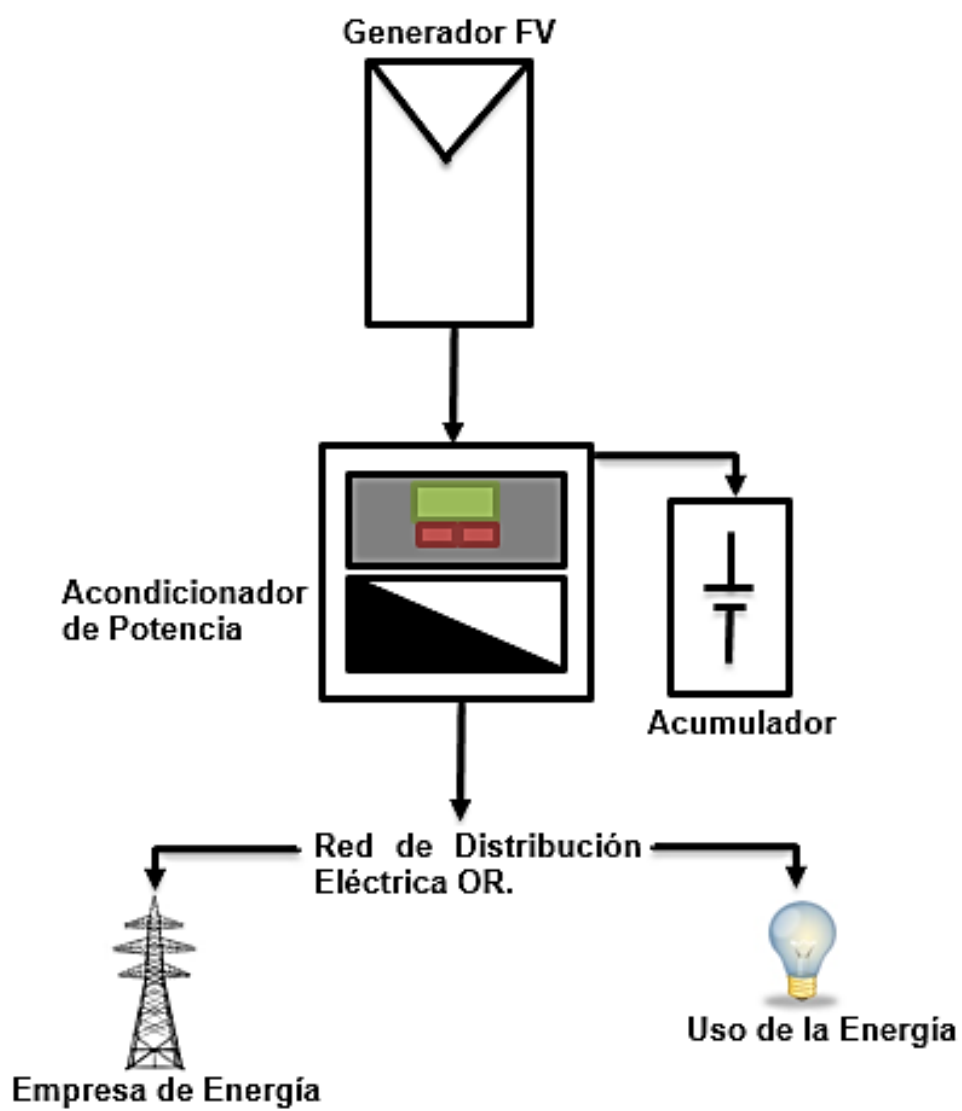


3.1.2.4 Sistemas interconectados

Son los sistemas eléctricos fotovoltaicos conectados a la red de eléctrica de distribución que tienen como objetivo principal ampliar cada cierto periodo de tiempo (valorado anualmente en casos generales), la producción de la energía eléctrica que es inyectada dicha red.

Es aplicada en las Ciudades y centros urbanos, como en los casos de uso residencial, comercial e industrial. (15)

Ilustración 60. Esquema de Sistemas Solares Interconectados

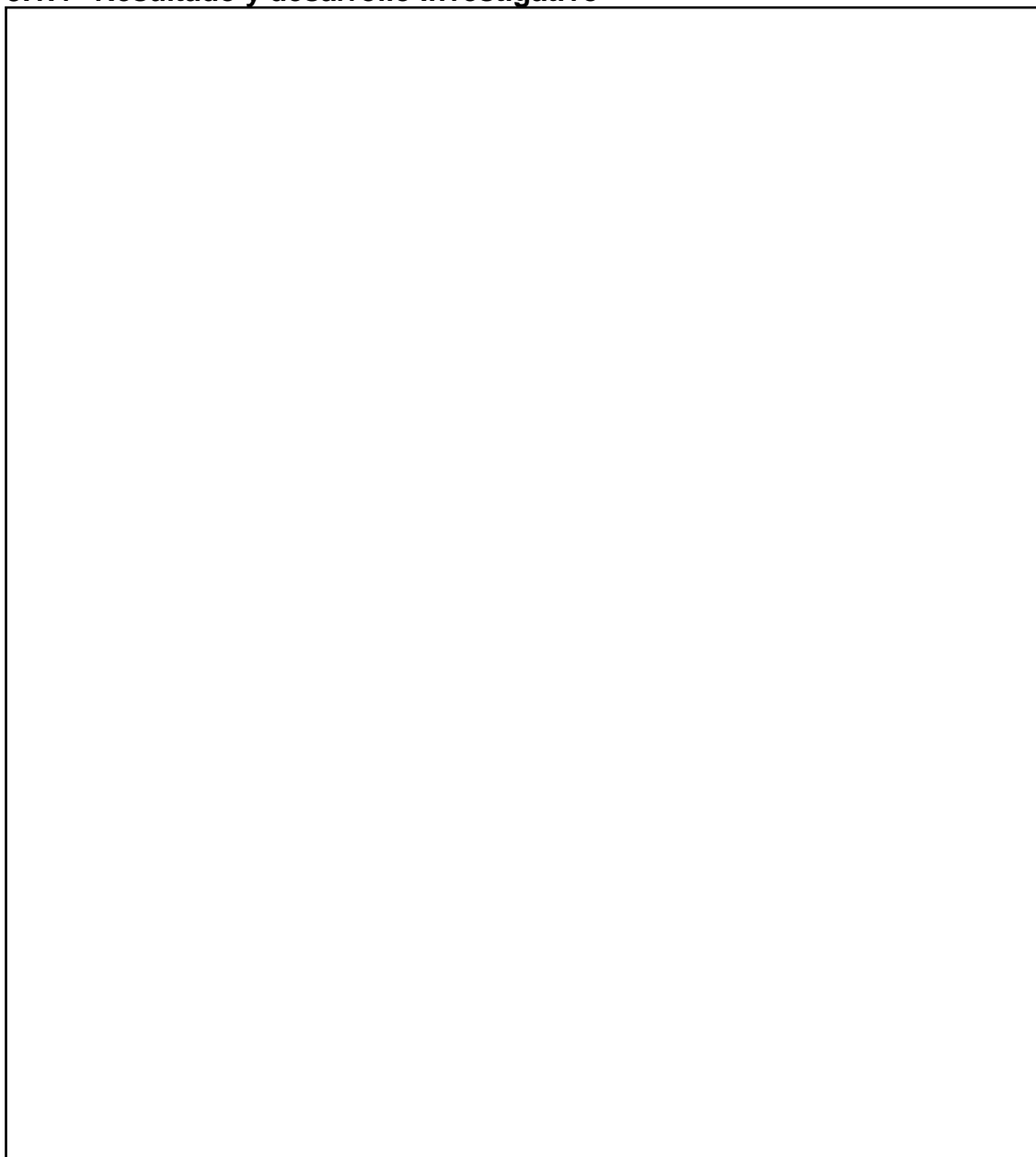


Fuente: Propia

3.1.3 Practica Investigativa

En esta práctica se debe realizar una investigación de dos modelos de sistemas Fotovoltaicos Autónomos e Interconectados que en la actualidad sean implementados en los diferentes escenarios a nivel mundial, en Colombia y a nivel regional. Describir los componentes aplicaciones y capacidad de cada sistema.

3.1.4 Resultado y desarrollo Investigativo

A large empty rectangular box with a black border, intended for the student to write the results and development of their investigation.

3.2 DISEÑO BANCO DE BATERÍAS

3.2.1 Introducción

Las instalaciones de energía solar fotovoltaica que no están conectadas a la red necesitan un sistema de acumulación de energía con el fin de que esta pueda ser suministrada durante los periodos de tiempo en los que los paneles no generan electricidad. El sistema mencionado está compuesto por baterías o acumuladores, por lo general de plomo-ácido o níquel-cadmio.

El conjunto de estas baterías interconectadas es denominado Banco de Baterías. Estos dispositivos acumuladores pueden ser de dos clases, de Carga Superficial, y de Carga Profunda. A las primeras pertenecen aquellas baterías cuya descarga diaria está en el 15% de su capacidad y que una o dos veces en un periodo de un año pueden alcanzar las descargas del 40% al 50% sin que se dañen sus materiales. A las segundas pertenecen aquellas baterías cuya descarga diaria es del 25% y que una o dos veces en el periodo de un año pueden alcanzar descargas del 80% de su capacidad.

Las baterías son dispositivos de almacenamiento que convierten la energía acumulada en energía eléctrica por medio de una reacción química. De esta forma pueden catalogarse también como Celdas Primarias o Celdas Secundarias.

Las **Celdas Primarias** son utilizadas una solo vez consecuente a la reacción interna dentro de ellas, no poseen la facultad de recarga. Debido a esto no son utilizadas para el diseño de sistemas fotovoltaicos, ya que se necesita baterías de carga y descarga obligatoria a diario para su operación. Ejemplo de este tipo de baterías son las de carbón-zinc.

Por otro lado las **Celdas Secundarias**, cuentan con una reacción reversible por lo que acumulan la energía de forma repetida, sin embargo, en cada proceso de acumulación no se realiza al 100% de eficiencia de almacenamiento. Esto sucede debido al calentamiento y cambios de tensión. Baterías de este tipo son las de Níquel-Cadmio [NiCad], Plomo-Acido y Níquel-Ferro.

Debido a sus características como celdas secundarias, es por esto que las baterías de plomo-acido son las más implementadas en sistemas fotovoltaicos. La reacción química que ocurre en el proceso de descarga de la celda de acumulación, genera la inversión y restauración de la carga, al aplicar corriente directa en la dirección opuesta al flujo de corriente en la descarga.

3.2.2 Marco Teórico

3.2.2.1 Capacidad de la Batería

Este parámetro define la cantidad de electricidad almacenada que puede lograrse en una descarga completa del dispositivo acumulador partiendo de un estado de carga total del mismo. Se mide en *Amperios Hora* (Ah), y se calcula como el producto de la intensidad de descarga de la batería por el tiempo en el que está actuando.

Ecuación 25. Capacidad de la Batería e Intensidad de descarga.

$$C = t * I \leftrightarrow I = \frac{C}{t}$$

(17)

C = Capacidad

t = Tiempo de descarga de la batería.

I = Corriente de Descarga

3.2.2.2 Estado de Carga EDC

Es la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía realmente almacenada. Interesa que sea un valor lo más alto posible (próximo al 100%, lo que indicaría que toda la energía utilizada para la recarga es factible de ser empleada en la salida de la instalación). Si la eficiencia es baja, será necesario aumentar el número de paneles solares para obtener los resultados deseados.

3.2.2.3 Profundidad de descarga PDD

Es la cantidad de energía, en tanto por ciento, que se obtiene de la batería durante una determinada descarga, partiendo del acumulador totalmente cargado. Está relacionada con la duración o vida útil del acumulador. Si los ciclos de descargas son cortos (en torno al 20%, por ejemplo), la duración del acumulador será mayor que si se le somete a descargas profundas (por ejemplo, del 80%).

Estos dos últimos parámetros se miden como un porcentaje de la capacidad total de la batería en Ah.

Ecuación 26. Capacidad Total.

$$C = PDD + ED \quad (17)$$

120

3.2.2.4 Eficiencia de Carga

Es la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía realmente almacenada. Interesa que sea un valor lo más alto posible (próximo al 100 %, lo que indicaría que toda la energía utilizada para la recarga es factible de ser empleada en la salida de la instalación). Si la eficiencia es baja, será necesario aumentar el número de paneles solares para obtener los resultados deseados. (17)

La eficiencia de la batería en Amperios-Hora (Ah), se define como la relación entre la capacidad de energía entregada por la batería durante la descarga y la capacidad suministrada a la batería durante la carga.

Ecuación 27. Eficiencia de Carga de batería.

$$Eficiencia [Ah] = \frac{[Ah_{salida}]}{[Ah_{entrada}]}$$

(11)

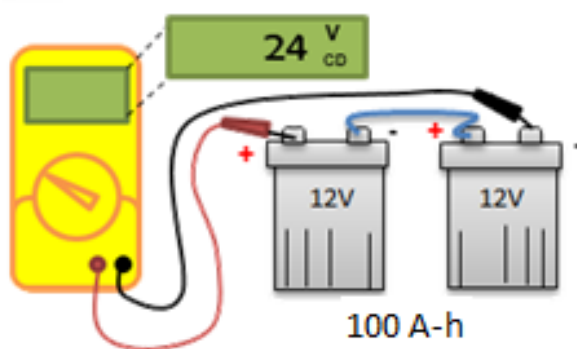
3.2.2.5 Conexión del Banco de baterías.

Existen dos formas de conectar un banco de baterías, y la configuración de la conexión depende de lo requerido en el diseño del sistema fotovoltaico. El nivel de tensión y la Capacidad requerida se alcanzan conectando las baterías individuales en serie (en el caso de querer incrementar el voltaje), o en paralelo (en el caso para incrementar la capacidad en Ah). El Banco de baterías conformado consistirá de baterías de celdas sencillas (2 unidades) o bloques (6 unidades), con tensiones de sistema generalmente de 24V o 48V.

3.2.2.5.1 Conexión Serie

Se realiza conectando la terminal positiva de una batería a la negativa de la otra, y así sucesivo al número de unidades que se requieran conectar. En el caso de conectar dos baterías de 12V con una capacidad de 100 Ah por unidad, se tiene un voltaje total de 24V con la misma capacidad de 100 Ah. La desventaja de la conexión en serie es que si una de las baterías del banco tiene una falla, afecta al resto de éste. Debido a esto se requiere monitoreo constante del estado del banco. (11)

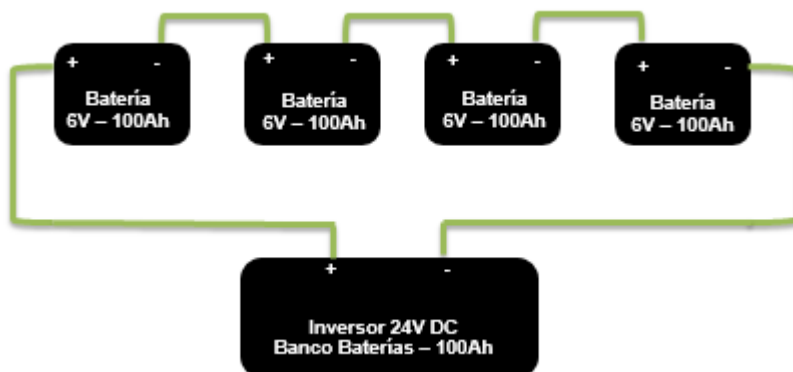
Ilustración 61. Conexión Serie de las Baterías, aumenta el voltaje y la capacidad se mantiene.



Fuente: Propia

Las baterías que se interconectarán en serie deben ser de la misma capacidad, incluyendo a esto la referencia eléctrica, el fabricante y modelo. Esto debe ser ya que por lo contrario la descarga, habrá un comportamiento desparejo y esto afectará tanto el desempeño como la vida del conjunto.

Ilustración 62. Banco de Baterías conectado en serie.

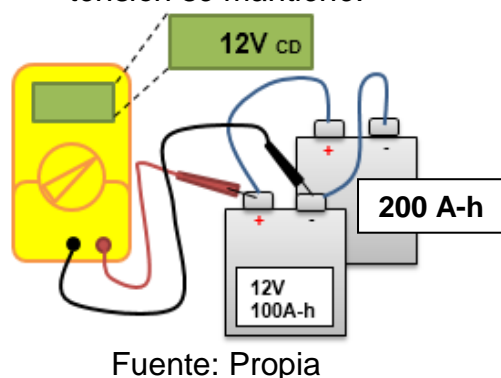


Fuente: Propia

3.2.2.5.2 Conexión en Paralelo

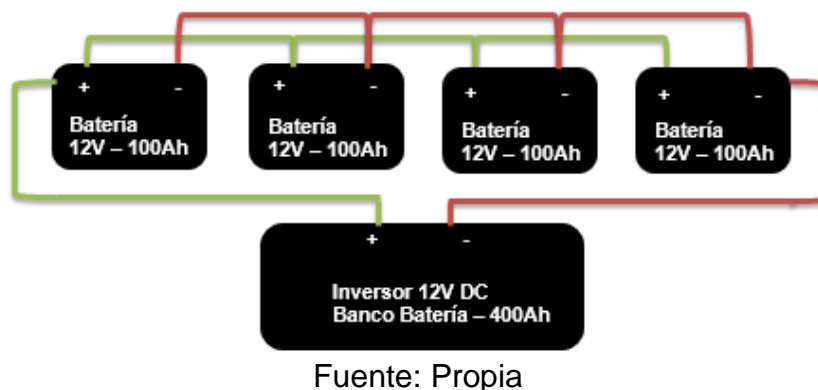
Se realiza conectando la terminal positiva de una batería con la positiva de otra, y lo mismo con las terminales negativas (se conectan negativa con negativa). Si se conectan dos baterías de 12V con capacidad de 100Ah cada una se tiene como resultado el mismo voltaje (12V), en la conexión paralelo, pero con una capacidad de 200 Ah, es decir, que la capacidad en Ah se suma en la conexión en paralelo.

Ilustración 63. Conexión paralela de las Baterías, aumenta la capacidad y la tensión se mantiene.



La configuración de la conexión en paralelo se utiliza cuando no es suficiente una batería para obtener la capacidad deseada. Un caso típico es el de algunas capacidades intermedias (200, 300 o 400Ah en tensiones de 12 o 24V), donde las mismas se pueden obtener asociando en serie y paralelo baterías en un bloque de 100Ah, según necesidad, y esto resulta más económico que utilizar celdas de 2V y de la capacidad deseada.

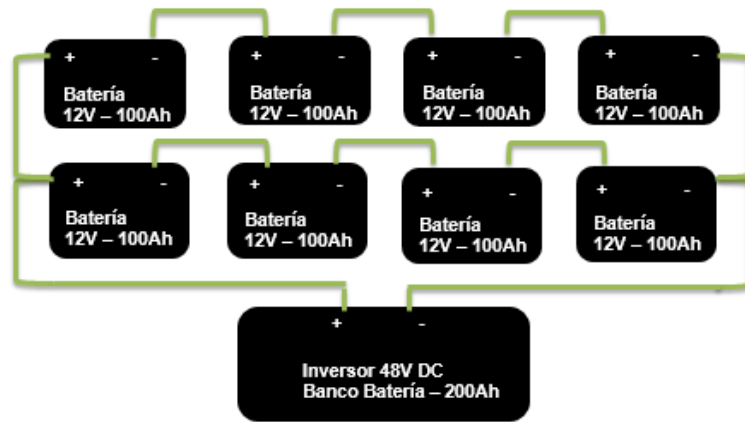
Ilustración 64. Banco de Baterías conectado en paralelo.



3.2.2.5.3 Conexión Serie-Paralelo

La aplicación de esta configuración es aprovechar las ventajas de las conexiones serie y paralelo para obtener las características eléctricas deseadas para el sistema fotovoltaico.

Ilustración 65. Conexión Serie-Paralelo de un Banco de Baterías.



Fuente: Propia

3.2.3 Desarrollo Experimental

3.2.3.1 Ensayo de la Conexión de dos Baterías en serie

Realizar una Conexión Serie de baterías. Realizar la caracterización y verificar el cumplimiento de la fórmula electrotécnica: seguir ilustración 66.

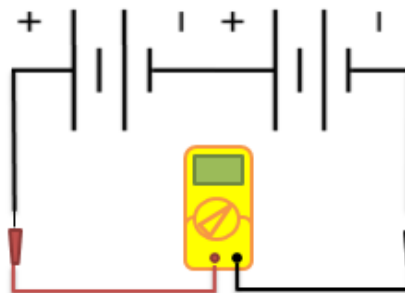
Ecuación 28. Tensión Total.

$$V_T = V_1 + V_2$$

Ecuación 29. Intensidad Total.

$$I_T = I_1 = I_2$$

Ilustración 66. Esquema de conexión en serie.

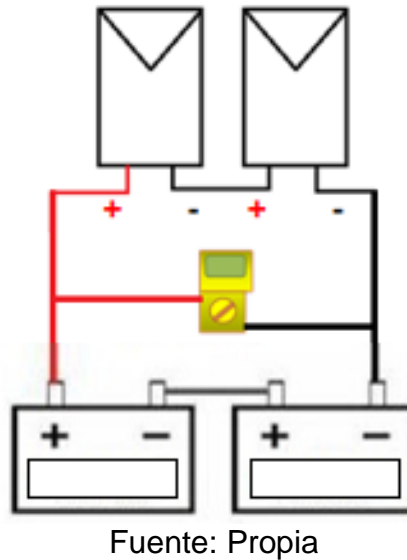


Fuente: Propia

Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis Teniendo como fuente de suministro dos paneles solares.

- ✓ Determinar la Capacidad de las Baterías en conexión Serie.
- ✓ Evaluar la Eficiencia del Banco en esta Configuración.

Ilustración 67. Ensayo con Baterías en Serie.



3.2.3.2 Ensayo de la Conexión de dos Baterías en paralelo

Realizar una Conexión paralela de baterías. Realizar la caracterización y verificar el cumplimiento de la fórmula electrotécnica:

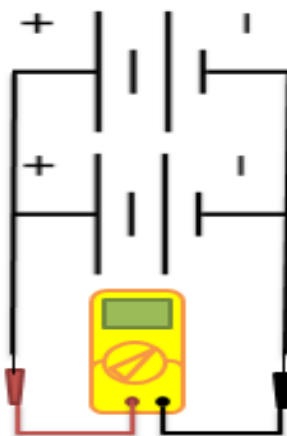
Ecuación 30. Tensión Total.

$$V_T = V_1 = V_2$$

Ecuación 31. Intensidad Total.

$$I_T = I_1 + I_2$$

Ilustración 68. Esquema de conexión en paralelo.

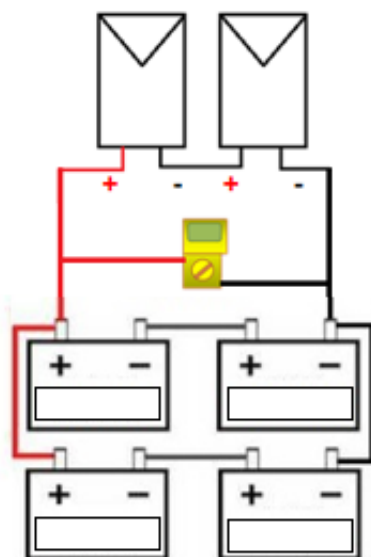


Fuente: Propia

Realizar los ensayos de caracterización para la toma de medidas y el posterior análisis. Teniendo como fuente de suministro dos paneles solares.

- ✓ Determinar la Capacidad de las Baterías en conexión Paralelo.
- ✓ Evaluar la Eficiencia del Banco en esta Configuración.

Ilustración 69. Esquema de ensayo con Baterías en Paralelo.



Fuente: Propia

3.2.4 Materiales para el desarrollo de la práctica

- ✓ 2 Paneles Solares FV de 32.4V, 4.3A, 88W cada una.
- ✓ 4 Baterías.
- ✓ Módulo De Lorenzo, Solarímetro
- ✓ 12 Conectores caimanos 60 -70 cm
- ✓ Voltímetro (Escala 2V en CC)
- ✓ Amperímetro (Escala 10A en CC)

3.2.5 Resultados

3.2.5.1 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión Baterías en serie.

Tabla 18. Medidas del ensayo en serie.

Tiempo [Horas]	1	2	3	4	5	6	7	8
Tensión [V]								
Corriente [A]								
Capacidad [A/h]								

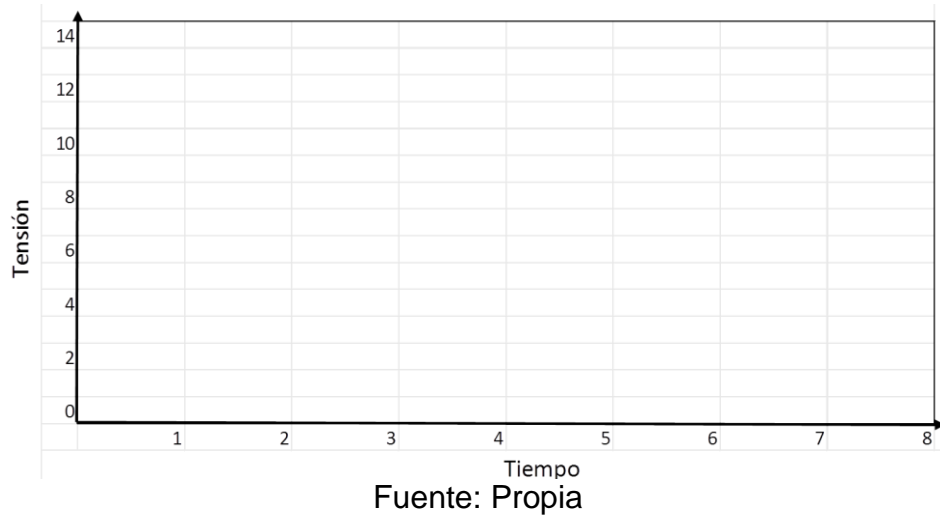
3.2.5.2 Variables Medidas del Ensayo de la Conexión Baterías en paralelo.

Tabla 19. Medidas del ensayo en paralelo.

Tiempo [Horas]	1	2	3	4	5	6	7	8
Tensión [V]								
Corriente [A]								
Capacidad [A/h]								

3.2.5.3 Grafica de control de carga de la Batería.

Ilustración 70. Grafica Tensión vs. Tiempo, Control de Carga.



3.2.6 Análisis de Resultados Conclusiones

Basado en los resultados obtenidos realizar el análisis operacional de cada disposición, mencionar las características y comprobar el cumplimiento de las formulas electrotécnicas del comportamiento de las variables de Tensión y Corriente de los circuitos serie, paralelo y mixto. Determinar las ventajas y desventajas que presenta la utilización de cada circuito.



3.3 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO

3.3.1 Introducción

Para este capítulo en el cual se dictan las pautas para el proceso de diseño y modelamiento matemático de un sistema fotovoltaico se deben tener en cuenta las siguientes referencias normativas indispensables que se deben aplicar para el correcto cálculo operacional del sistema fotovoltaico y que su información es derivada de las Normas Técnicas Colombianas. Dichas referencias citadas son:

- NTC 2050: 1998, Código eléctrico Colombiano.
- NTC 2883: 1991, Energía fotovoltaica. Módulos fotovoltaicos.
- NTC 4405: 1998, Eficiencia energética. Evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos y sus componentes. ⁽¹⁰⁾

3.3.2 Marco Teórico

En primer lugar se debe introducir un concepto fundamental, el de las “Horas de Sol Pico” o HPS [horas]. Se puede definir como el número de horas en que disponemos de una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m². Es decir, una hora solar pico “HPS” equivale a 1kWh/m² o, lo que es lo mismo, 3.6 MJ/m². Dicho en otras palabras, es un modo de contabilizar la energía recibida del sol agrupándola en paquetes, siendo cada “paquete” de 1 hora recibiendo 1000 watts/m².

En este punto, hay que hacer un apunte importante, la irradiancia y la irradiación. La **Irradiancia** es la magnitud que describe la radiación o intensidad de iluminación solar que llega hasta nosotros medida como una potencia instantánea por unidad de superficie, W/m² o unidades equivalentes.

La **Irradiación**, es la cantidad de irradiancia recibida en un lapso de tiempo determinado, es decir, la potencia recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie. Se suele medir en Wh/m² o, en caso de un día, en Wh/m²/día o unidades equivalentes.

Para calcular entonces el valor de HPS se debe dividir el valor de la irradiación incidente entre el valor de la potencia de irradiancia en condiciones estándar de medida (STC), pues es en esas condiciones donde se cumplen las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos. Ese valor de irradiancia en condiciones estándar de medida es de 1000 watts/m². Es decir, si se dispone de los datos de irradiación solar de un determinado día y se divide entre 1000, se obtienen las

HSP. Por ejemplo, si tenemos una irradiación de 3.800 Wh/m^2 , para pasarla a HSP, se divide entre 1.000 W/m^2 , con lo que obtenemos 3.8 HPS.

Como se ha comentado anteriormente, existen una gran cantidad de métodos para dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo. Analizando muchos de ellos se han extraído diferentes conclusiones y, se ha observado que, prácticamente todos ellos siguen un esquema muy similar, que presentamos a continuación. Muchas veces la única diferencia entre unos y otros son el empleo de diferentes expresiones a la hora de calcular principalmente el tamaño del generador y del sistema de acumulación, además de lo que podría denominarse la filosofía de dimensionado. Se presenta a continuación los pasos que se han de seguir en el dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo.

- Paso 1. Estimación de radiación solar global sobre superficies inclinadas.
- Paso 2. Estimación del consumo
- Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico
- Paso 4. Dimensionado del sistema de acumulación
- Paso 5. Dimensionado del regulador
- Paso 6. Dimensionado del inversor
- Paso 7. Dimensionado del cableado

3.3.2.1.1 Estimación de radiación solar global sobre superficies inclinadas.

Cuando se realiza el dimensionamiento de sistema fotovoltaico el primer paso consiste en evaluar la radiación solar directa e indirecta en el sitio donde serán instalados los módulos generadores fotovoltaicos. Existen diversos informes en los que se encuentran tablas con valores típicos de radiación de lugares en diferentes épocas del año y con diferentes inclinaciones. La razón de la búsqueda de la inclinación óptima se debe a la posición y ubicación en que se debe colocar el módulo solar para que sea más eficiente el sistema fotovoltaico durante todo el periodo del año. La determinación de los valores típicos encontrados en las tablas se explica a continuación:

3.3.2.1.2 Determinación de la Radiación Solar

Para poder explicar cómo se calculan las tablas de radiación en un lugar determinado, Se realiza un ejemplo ilustrativo, de cómo se calcula para un día al año, a cierto ángulo y posición, lo cual por medios de tablas de calculo que se crean, se hace para diferentes ángulos, diferentes fechas y diferentes posiciones.

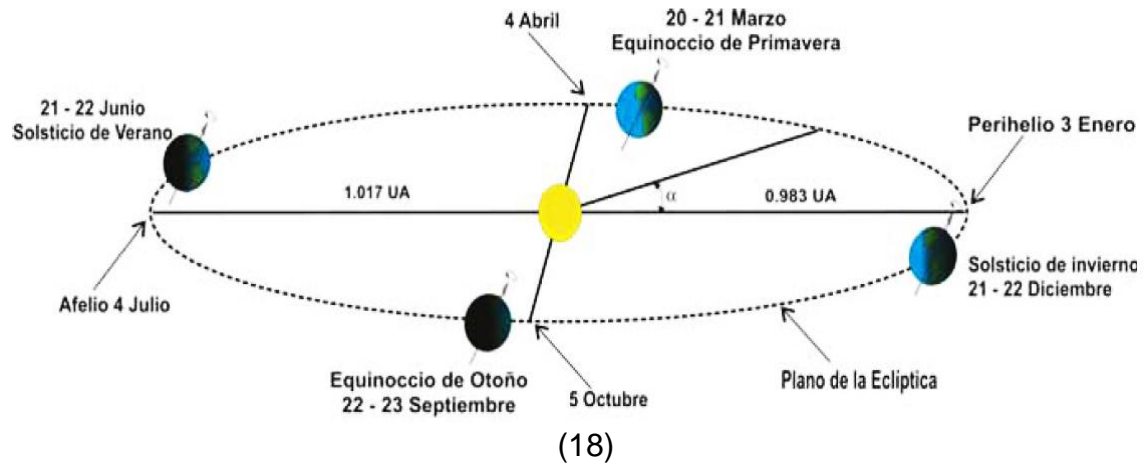
Ejemplo aplicativo:

Determinar la radiación solar global que incide:

b) Para una superficie orientada hacia el norte en el mismo lugar y en la misma fecha.

Otro parámetro que se debe tener en cuenta es la posición de la tierra en la órbita espacial de su movimiento alrededor del sol. Este dependerá de la temporada del ciclo anual en la que se realice el estudio fotovoltaico.

Ilustración 72. Posición Angular de la Tierra dentro de la órbita Solar.



En la Ilustración 67 se muestra el ángulo que se forma entre el Perihelio y el día recorrido a través de la órbita que corresponda a la evaluación del estudio a realizar. Éste ángulo es denominado alfa [α].

$$\alpha = \text{posición angular de la Tierra en la órbita.}$$

El ángulo se debe calcular mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 32. Posición angular de la tierra en la órbita solar.

$$\alpha = \frac{2 * \pi (nd - 1)}{365} \quad (18)$$

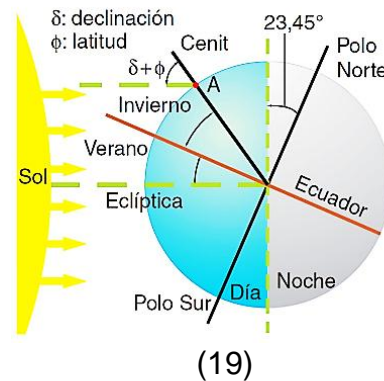
Para el desarrollo del ejemplo aplicativo se remplace nd por 118, valor equivalente al número de días del año transcurridos hasta el 28 de abril. El valor de 365 equivale al periodo dado en número de días en que la Tierra cumple con totalidad el recorrido en la órbita.

$$\alpha = \frac{2 * \pi (118 - 1)}{365}$$

$$\alpha = 2,01406 \text{ Radianes}$$

Una vez obtenido el resultado podemos obtener el *Angulo de Declinación* que se conoce como δ .

Ilustración 73. Declinación de la Tierra.



(19)

Los valores diarios de la declinación solar pueden calcularse con un error máximo de 0,0006 rad., mediante otra fórmula obtenida por Spencer: (20)

Ecuación 33. Angulo de Declinación.

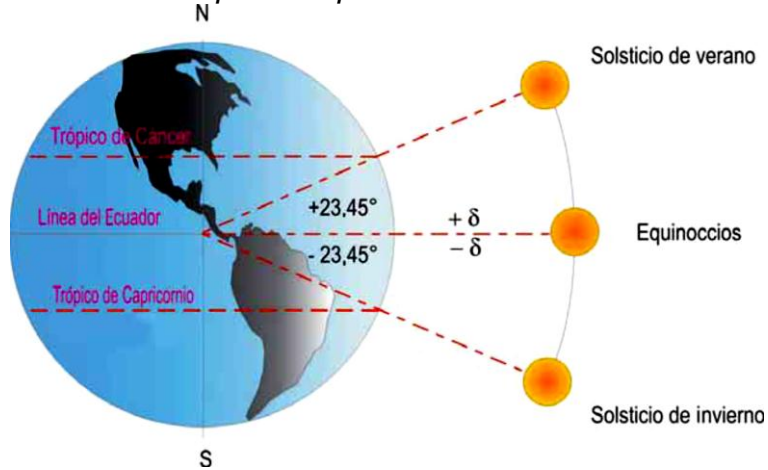
$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \alpha + 0,070257 \operatorname{sen} \alpha - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \operatorname{sen} 2\alpha - 0,002697 (1 - 4) \cos 3\alpha + 0,00148 \operatorname{sen} 3\alpha) / (180/\pi)$$

(18)

Se reemplaza el valor del ángulo de posición de la Tierra dentro de la órbita solar, de la ecuación 32 en la ecuación 33. ($\alpha = 2,01406$) y se calcula la declinación:

$$\delta = 13,8942 \leftrightarrow \delta = 13^{\circ} 5$$

Ilustración 74. Esquema del cambio de declinación con movimiento del Sol respecto al plano del Ecuador.



(18)

Una vez obtenida la declinación pasamos a calcular el alguno horario de la posición de la salida del Sol, que se conoce como ω_s por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 34. Ecuación 34. Angulo Horario.

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi * \tan \delta$$

Este ángulo se evalúa dependiendo a la ubicación geográfica, si es del lado del hemisferio norte o del hemisferio sur. Dicha evaluación se realiza sobre dos condiciones donde se elige el valor mínimo denominado ω_s' .

Las ecuaciones que definen los valores mínimos respectivos de cada hemisferio son las siguientes:

Ecuación 35. Angulo de Puesta al Sol para hemisferio Norte.

$$\omega_s' = \text{mín} [\arccos[-\tan \varphi \tan \delta], \arccos[-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta]]$$

Ecuación 36. Angulo de Puesta al Sol hemisferio Sur.

$$\omega_s' = \text{mín} [\arccos(-\tan \varphi \tan \delta), \arccos(-\tan(\varphi + \beta) \tan \delta)]$$

Para el desarrollo del ejemplo se tiene en cuenta la ecuación 35 ya que Bogotá está ubicada en el hemisferio norte. Reemplazando los ángulos de declinación δ , de latitud en la ecuación φ , y el ángulo de inclinación del panel β se realiza el cálculo del valor mínimo del ángulo horario:

$$\omega_s' = 91,0667 \leftrightarrow 91^\circ 0,4'$$

Para hallar la duración del día se determina duplicando el ángulo horario ω_s ("s" de salida del Sol) y dividiéndolo entre 15 para pasar de grados a horas.

Ecuación 37. Duración del día.

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan\varphi * \tan\delta)$$

Esta ecuación solo es válida cuando el valor absoluto $(-\tan\varphi * \tan\delta) \leq 1$. Para las latitudes mayores a $66,6^\circ$, dependiendo de la época del año ésta condición no se satisface ya que el día puede tener 24 horas ó 0 horas de sol.

➤ Superficies en el hemisferio norte, inclinadas y orientadas hacia el Sur

Para superficies que se hallan en el hemisferio norte, inclinadas con cualquier ángulo, pero dirigidas hacia el sur, \overline{Rb} se puede calcular mediante la siguiente expresión:

Ecuación 38. Referencia Hacia el Sur.

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \sin\omega_s' + (\pi/180)\omega_s' \sin(\varphi - \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin\delta \sin\varphi}$$

Donde ω_s' es el ángulo de puesta del Sol sobre una superficie inclinada; y su valor es el menor entre los dos ángulos ω_s y $\arccos(-\tan(\varphi - \beta) \tan\delta)$.

➤ Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el Norte

Para superficies que se hallan en el hemisferio sur, inclinadas con cualquier ángulo, pero dirigidas hacia el norte, \overline{Rb} se puede calcular mediante la siguiente expresión:

Ecuación 39. Referencia hacia el Norte.

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cos\delta \sin\omega_s' + (\pi/180)\omega_s' \sin(\varphi + \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin\varphi \sin\delta}$$

Donde ω_s' es el ángulo de puesta del Sol sobre una superficie inclinada; y su valor es el menor entre los dos ángulos ω_s y $\arcsin(-\tan(\varphi + \beta) \tan \delta)$.

Una vez obtenido todos los ángulos (declinación, latitud e inclinación del módulo fotovoltaico), se usa la ecuación de superficies en el hemisferio norte con orientación hacia el sur, inclinadas y orientadas hacia el Sur. Para hallar \overline{Rb} , Razón obtenida del promedio diario mensual de la radiación sobre una superficie inclinada y el promedio diario mensual de la radiación sobre la superficie horizontal.

Al reemplazar los valores en la Ecuación 38, el resultado de la razón con orientación hacia el sur obtenida es:

$$\overline{Rb} = 0,92$$

Una vez tenido la relación \overline{Rb} , se procede con el cálculo de la radiación solar fuera de la atmosfera.

➤ Radiación Solar Fuera de la Atmosfera.

La radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal fuera de la atmosfera terrestre denotada por $H_0(n)$, donde n es el número del día del año, establecida en una latitud determinada.

Tanto H_0 como N se calculan teniendo en cuenta la posición geográfica del lugar, la declinación solar y el ángulo horario para la salida del sol. Específicamente para cada salida del sol en el año por la siguiente ecuación:

Ecuación 40. Radiación Global Fuera de la Atmosfera.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_0 \left[\frac{R_0}{R} \right]^2 (\cos \delta * \cos \varphi * \sin \omega_s + \frac{2\pi}{360} * \omega_s * \sin \delta * \sin \varphi)$$

De la ecuación 40 los parámetros son:

I_0 = Constante solar de 1367 W/m².

δ = Declinación solar en radianes.

φ = Latitud del lugar en radianes.

ω_s = Ángulo de horario de salida del sol en el día determinado en radianes.

$\left[\frac{R_0}{R} \right]^2$ = Corrección por excentricidad de la órbita terrestre.

Para el desarrollo de la ecuación 40, de debe calcular la corrección por excentricidad de la órbita terrestre, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 41. Distancia promedio Tierra-Sol.

$$\left[\frac{R_0}{R}\right]^2 = 1,0001 + 0,034221 * \cos\alpha + 0,00128 * \sen\alpha + 0,000719 * \cos 2\alpha \\ + 0,000077 * \sen 2\alpha$$

En donde R_0 es la distancia promedio Tierra-Sol. Y R es la distancia la tierra-sol. Para el desarrollo del ejemplo se reemplaza el valor de la posición angular de la tierra en la órbita del sol ($\alpha = 2,01406$ Radianes) en la ecuación 41, el resultado de la corrección por excentricidad es:

$$\left[\frac{R_0}{R}\right]^2 = 1,035807482$$

Con este resultado, se reemplaza en la ecuación 40. Se desarrolla el cálculo de la radiación solar global fuera de la atmosfera y el resultado es:

$$H_0 = 10,3 \text{ KWh}/m^2$$

Con este valor obtenido, se procede a calcular el índice de claridad conocido como k_t cuyo valor es directamente proporcional a la fracción de brillo solar $\left[\frac{n}{N}\right]$.

Ecuación 42. Índice de Claridad.

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = \left[\beta + (\alpha - \beta) * \frac{n}{N}\right] = k_t$$

De esta ecuación los parámetros son:

n = Número de horas brillo sol.

N = Duración del día.

β = Inclinación de Modulo Solar.

\bar{H} = Radiación solar diaria promedio.

Teniendo que la radiación solar global diaria promedio \bar{H} es de valor $3,7 \text{ KWh}/m^2$ para el desarrollo de este ejemplo con la fecha en el mes de Abril, se calcula el índice de claridad por la ecuación 42.

$$k_t = \frac{\bar{H}}{H_0} = \frac{3,7 \text{ KWh}/m^2}{10,3 \text{ KWh}/m^2} = 0,36$$

Con el valor de índice de claridad se prosigue a hallar la relación de la Relación Difusa y la Relación de Radiación Solar Diaria connotada como $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$. Para determinar su valor existen 4 intervalos dependiendo del valor del índice de claridad:

$$\text{Para } k_t \leq 0,17 \leftrightarrow \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0,99$$

$$\text{Para } 0,17 < k_t < 0,75 \leftrightarrow \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1,188 - 2,272k_t + 9473k_t^2 - 21,865k_t^3 + 14,648k_t^4$$

$$\text{Para } 0,75 < k_t < 0,8 \leftrightarrow \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = -0,54k_t + 0,632$$

$$\text{Para } k_t \geq 0,8 \leftrightarrow \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0,2$$

Para el desarrollo de nuestro ejemplo teniendo en cuenta el valor de $k_t = 0,36$ se utiliza el segundo intervalo, y como resultado la Relación de radiación solar global diaria es:

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 0,83 \text{ KWh/m}^2$$

De este valor, se despeja la radiación difusa $\overline{H_d}$.

$$\overline{H_d} = \overline{H} * 0,83 = 3,7 * 0,83 = 0,3071 \text{ KWh/m}^2$$

La radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada $\overline{H}(\beta)$, ilustración 65, puede calcularse como:

Ecuación 43. Radiación Global diaria a un ángulo de inclinación β determinado.

$$\overline{H}(\beta) = \overline{R} * \overline{H}$$

Donde \overline{H} es la radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal.

Ecuación 44. Razón Obtenida

$$\overline{R} = [(\overline{H} - \overline{H_d})/\overline{H}] \overline{R_b} + (\overline{H_d}/\overline{H}) * (1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2$$

\overline{R} = Razón obtenida del promedio diario mensual de la radiación sobre una superficie inclinada y el promedio diario mensual de la radiación sobre la superficie horizontal.

β = Inclinación de la superficie

$\overline{H_d}$ = Radiación solar difusa

r = Reflectancia de la superficie, para el desarrollo de este ejemplo tiene un valor de 0,2. Este valor depende del material de la superficie.

Tabla 20. Reflectancia de superficies.

Materiales de Superficies	Reflectancia
Pasto	0,2
Ladrillo Rojo	0,12
Madera Lisa	0,22
Concreto	0,35
Aluminio	0,88
Pintura Negra	0,05
Pintura Blanca	0,43

Fuente: Manualparedes (21)

Al reemplazar los valores en la ecuación 44, el valor de la Razón es:

$$\bar{R} = 0,9816$$

Este entonces se reemplaza en la ecuación de Radiación global diaria a un ángulo de 10° para el desarrollo del ejemplo. Entonces el resultado es:

$$\bar{H} (10^\circ) = 0,9816 * 3,7 = 3,63192 \text{ KWh/m}^2$$

Este procedimiento se debe realizar para cada mes del año y cada ángulo de inclinación evaluado, con lo cual se hacen el registro de datos promediados en tablas de radiación global diaria.

3.3.2.2 Estimación del consumo

La demanda de energía impone muchas de las características de la instalación, por lo que en la planificación de las necesidades se debe anotar todo lo relacionado con los diferentes aparatos eléctricos que serán la carga del sistema. En primer lugar se deberá calcular la energía que el usuario necesitará diariamente. Para ello se deberá determinar la potencia de todos los aparatos de que constará la instalación, individualmente, junto con el tiempo medio de uso de cada uno de ellos. En caso de duda, tanto la potencia como el tiempo medio de uso se deberán redondear hacia arriba. Posteriormente se podrán calcular diferentes consumos, como podrían ser consumos anuales, medios anuales, etc. Se pueden distinguir principalmente cuatro tipos de consumo referidos a la escala de tiempo que interese. De este modo se podrán distinguir los tres consumos siguientes:

- a) **Consumo medio diario:** Es el consumo eléctrico producido en media en un día cualquiera. Su unidad de medida es el Wh/día. El símbolo que emplearemos para medirlo es L_{md} .
- b) **Consumo medio diario mensual:** Es la media mensual del consumo anterior. A efectos prácticos, se supone que en cada mes del año el consumo es constante, por lo que coincidirán estos dos primeros consumos. En este capítulo se considerará así, por lo que el consumo medio diario y el consumo medio diario mensual serán el mismo, y sólo haremos uso del consumo medio diario.
- c) **Consumo total anual:** El consumo total anual es el producto del consumo medio diario por el número de días de consumo a lo largo de un año. Su unidad de medida es el Wh. El símbolo que emplearemos para este consumo es L_T .
- d) **Consumo medio diario anual:** Es la media del consumo anterior. Cuando el consumo medio diario es constante (todos los días se suponen con un mismo consumo), el consumo medio anual y el consumo medio diario coincidirán. En cualquier otro caso no será así, como se podrá comprobar en los ejemplos que se muestran

Posteriormente, la unidad de este consumo será de nuevo el Wh/día. Su símbolo será L_{ma} . Conocidos todos los aparatos, potencias y tiempos de uso, la expresión para calcular el primer consumo definido, es decir, el consumo medio diario (L_{md}), distinguiendo entre los aparatos de corriente alterna y continua (añadiremos en este caso los subíndices AC y DC respectivamente) será:

Ecuación 45. Energías Consumidas.

$$L_{md\ AC} = \sum P_{AC} \cdot t_{di}$$

$$L_{md\ DC} = \sum P_{DC} \cdot t_{di}$$

Siendo:

$L_{md\ AC}$: Energía consumida en AC (Wh/día) (L = “Load” = Carga en inglés)

$L_{md\ DC}$: Energía consumida en DC (Wh/día)

P_i : Potencia Nominal (W) (AC y DC)

t_{di} : Tiempo diario de uso (h / día)

Para calcular el consumo medio diario, se tendrán en cuenta los rendimientos de las etapas existentes aplicando la siguiente expresión:

Ecuación 46. Consumo Medio Diario.

$$L_{md} = \frac{L_{md\ DC} + \frac{L_{md\ AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{BAT} * \eta_{CON}}$$

Donde:

L_{md} : Consumo medio diario (energía requerida por el sistema en un día Wh/día)

η_{BAT} : Rendimiento de la batería

η_{INV} : Rendimiento del inversor

η_{CON} : Factor de rendimiento de conductores

El consumo medio diario L_{md} , refleja la energía que el sistema demanda en su conjunto en un día, y es un dato importante a la hora de dimensionar el generador fotovoltaico.

El consumo total anual se calculará entonces con la siguiente expresión:

Ecuación 47. Consumo Total.

$$L_T = L_{md} * N_d$$

Donde:

L_T : Consumo total anual (energía total requerida por el sistema en un año Wh).

N_d : Número de días de funcionamiento del sistema a lo largo de un año.

Ecuación 48. Consumo medio diario anual.

$$L_{ma} = L_T / N_d$$

Donde:

L_{ma} : Consumo medio diario anual (energía total media requerida por el sistema en un año Wh).

N_d : Número de días de funcionamiento del sistema a lo largo de un año.

3.3.2.3 Dimensionado del Generador Fotovoltaico

Una vez que la demanda energética de la carga es conocida, se está en condiciones de dimensionar el generador fotovoltaico (GFV). Las expresiones que se utilicen dependerán de los diferentes métodos que se expondrán y se detallarán a continuación:

3.3.2.4 Cálculo de la posición óptima de los módulos fotovoltaicos

El siguiente paso en el dimensionado de un sistema fotovoltaico autónomo (aunque aquí podría considerarse este paso más como parte del diseño que del dimensionado) será la determinación de la inclinación y orientación de la superficie receptora donde se ubicarán los módulos fotovoltaicos. La posición de una superficie receptora queda perfectamente definida por medio de dos ángulos. El primero de ellos es el **ángulo de inclinación** (ángulo formado entre la horizontal y

la superficie receptora) y el segundo de ellos es el **ángulo de orientación** (ángulo formado entre la proyección de la normal de la superficie receptora sobre la horizontal y la dirección sur-norte).

En este paso entra en juego la radiación solar global recibida sobre el sistema fotovoltaico (emplearemos el símbolo G_d y como unidad el KW/m^2). Puesto que existe otro capítulo dedicado al estudio y tratamiento de la radiación solar, no entraremos en detalle en ella. Simplemente recordar que lo más usual será disponer de diferentes tablas (generalmente en escala mensual) de la radiación solar global que se recibe sobre una superficie situada en dirección sur y para diferentes inclinaciones (generalmente de 10 en 10 grados).

Para determinar la posición a la que se ha de situar la superficie receptora nos podríamos encontrar con diferentes opciones. Una posible opción es que los módulos se hayan de situar, por ejemplo, en el tejado, ya construido, de cierto edificio. Este tejado tendrá una determinada inclinación y orientación. En este caso, la superficie receptora se tendría que ajustar a dicho tejado y, por tanto, la inclinación y orientación de la misma ya vendría fijada. Supongamos, sin embargo, que se nos presenta la opción de situar los módulos fotovoltaicos en aquella posición que sea más favorable para optimizar el funcionamiento del sistema. Esto es lo que denominaremos determinación o cálculo de la posición óptima de los módulos fotovoltaicos. La **orientación óptima** para optimizar el sistema será la dirección **sur**, y para calcular la **inclinación óptima** se puede seguir el **criterio de máxima captación energética anual** o el **criterio de mes crítico o mes peor**, que suele ser el más empleado.

3.3.2.5 Cálculo de la inclinación y tamaño óptimos de los módulos fotovoltaicos

Se distinguirá si el regulador de carga presenta MPPT o no. En el primer caso se trabajará con la potencia pico del GFV, mientras que en el segundo se utilizará la corriente pico del mismo.

3.3.2.5.1 Funcionamiento en el punto de máxima potencia

Este método es válido para SFA con seguidor del punto de máxima potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracker), por lo que se considerará que se opera con la potencia del Generador en el punto de máxima potencia en condiciones estándares de medida (STC), $P_{\text{MPP, STC}}$.

3.3.2.5.1 Criterio del mes peor

En este caso el cálculo de la inclinación óptima de la superficie receptora se hará de forma que se optimice la relación Consumo / Radiación en cada mes. Se procederá siguiendo los siguientes apartados:

En primer lugar se habrá de disponer de una tabla con los valores de la **radiación solar global** recibida en cada mes (generalmente medida en kWh/m² ó en Horas Solares Pico, HPS) y para diferentes inclinaciones. Esta tabla podría ser similar a la siguiente:

Tabla 21. Irradiación Global diaria media mensual.

Mes	G_d Irradiación Global diaria media mensual (kWh/m²).						
	Indica también las HPS						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	1,385	1,514	1,584	1,625	1,636	1,617	1,569
Feb	2,036	2,139	2,176	2,176	2,139	2,066	1,960
Mar	3,062	3,104	3,078	3,004	2,882	2,718	2,516
Abr	4,040	4,041	3,970	3,837	3,647	3,405	3,119
May	4,121	4,109	4,024	3,872	3,658	3,387	3,069
Jun	4,743	4,702	4,587	4,399	4,143	3,828	3,464
Jul	4,558	4,526	4,421	4,244	4,002	3,701	3,352
Ago	4,071	4,075	4,005	3,870	3,674	3,423	3,126
Sep	3,571	3,584	3,530	3,421	3,260	3,053	2,806
Oct	2,374	2,467	2,492	2,474	2,415	2,316	2,180
Nov	1,624	1,744	1,803	1,829	1,823	1,785	1,716
Dic	1,205	1,342	1,422	1,476	1,501	1,499	1,467

En segundo lugar, sobre la tabla anterior se calculará el cociente Consumo medio diario mensual (que en nuestro caso es equivalente al Consumo medio diario) y Radiación Solar Global, es decir, se dividirá cada celda de la tabla anterior por el consumo medio diario en cada mes. Para exponer como quedaría esa nueva tabla supongamos un consumo medio diario mensual de 3000 Wh /día. Quedaría una nueva tabla así:

Tabla 22. Inclinación de Paneles por mes.

Mes	Lmd / G_d						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	2166	1982	1894	1846	1834	1855	1912
Feb	1473	1403	1379	1379	1403	1452	1531
Mar	980	966	975	999	1041	1104	1192
Abr	743	742	756	782	823	881	962

May	728	730	746	775	820	886	978
Jun	633	638	654	682	724	784	866
Jul	658	663	679	707	750	811	895
Ago	737	736	749	775	817	876	960
Sep	840	837	850	877	920	983	1069
Oct	1264	1216	1204	1213	1242	1295	1376
Nov	1847	1720	1664	1640	1646	1681	1748
Dic	2490	2235	2110	2033	1999	2001	2045

Según esta última tabla, se ofrece para cada inclinación y para cada mes, la potencia necesaria del GFV indicada en W_p para suplir las necesidades de las cargas asociadas al sistema. A continuación se han de hacer los dos siguientes cálculos:

Paso 1. Para cada inclinación se tomará el *Máximo* cociente, obteniendo de este modo el *Mes Crítico* para cada inclinación.

Paso 2. Se elige de todos los máximos anteriores el *Menor*, de forma que se minimice la potencia del GFV necesaria para hacer frente al *mes crítico*.

Se señala el menor de todos esos máximos de los valores de inclinación:

Tabla 23. Menor de valores máximos de inclinación.

Mes	Lmd / Gd						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	2166	1982	1894	1846	1834	1855	1912
Feb	1473	1403	1379	1379	1403	1452	1531
Mar	980	966	975	999	1041	1104	1192
Abr	743	742	756	782	823	881	962
May	728	730	746	775	820	886	978
Jun	633	638	654	682	724	784	866
Jul	658	663	679	707	750	811	895
Ago	737	736	749	775	817	876	960
Sep	840	837	850	877	920	983	1069
Oct	1264	1216	1204	1213	1242	1295	1376
Nov	1847	1720	1664	1640	1646	1681	1748
Dic	2490	2235	2110	2033	1999	2001	2045

Por tanto, en este caso la inclinación óptima a la que habría que situar los módulos sería de 40°, y la potencia total del GFV sería de 1999 W_p .

Como ventajas de este método cabe resaltar que se garantiza el suministro de energía durante todo el año, al mismo tiempo que alarga sustancialmente la vida útil de las baterías. No obstante, en su contra destaca el excesivo sobredimensionamiento del GFV lo que incidirá notablemente en su coste.

3.3.2.5.1.2 Criterio de máxima captación energética anual.

Este criterio es el utilizado en sistemas conectados a red. Aunque no suele utilizarse en sistemas autónomos en los que no exista un generador auxiliar, puede ser interesante tenerlo en cuenta en SFA híbridos donde existe una fuente auxiliar de energía.

Presenta como ventajas que va a ofrecer un GFV con un tamaño menor al que se obtendría considerando el método del mes crítico. No obstante, para muchos meses se estará subdimensionando el tamaño del GFV, lo que incidirá no sólo en el suministro de energía sino en la disminución de la vida útil de la batería. Si se quiere paliar ambos aspectos se deberá incorporar un generador auxiliar.

En este caso lo que se pretende es determinar la inclinación óptima a la que habría que situar la superficie receptora de forma que se optimice la relación Consumo – Radiación, no en el mes crítico, sino a lo largo de todo un año. En este caso se procederá de forma muy similar al caso anterior, salvo que sólo se tendrán en cuenta la radiación solar global **media** anual (la media de los doce valores mensuales) para cada inclinación y el consumo que en este caso será el consumo medio anual (L_{ma}). La tabla de origen en este caso sería similar a la siguiente:

Tabla 24. Radiación Global Media.

Media Anual	G_d Global (kWh/m ²)						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	3.066	3.112	3.091	3.019	2.898	2.733	2.529

Tabla 25. Relación Consumo-Radiación.

Media Anual	L_{ma} / G_d						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	979	964	971	994	1035	1098	1186

Por último, el óptimo será el menor:

Tabla 26. Valor óptimo de Relación Consumo-Radiación.

Media Anual	L_{ma} / G_d						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	979	964	971	994	1035	1098	1186

Siguiendo con este caso, la inclinación óptima ahora sería de 10°.

Independientemente del criterio escogido (mes crítico o máxima captación energética actual) el siguiente paso será calcular el número total de módulos fotovoltaicos que se han de instalar, y a partir de este número total se pueden calcular el número de módulos a conectar en serie y el número de módulos a conectar en paralelo.

Para calcular el número total de módulos del generador, ha de considerar un factor global que incluya diferentes tipos de pérdidas, como pueden ser por dispersión, conexionado, por temperatura, por no trabajar en el punto de máxima potencia, etc. Este factor global (P_G o PR) suele tener un valor entre el 90 % y el 65 % según se trate de módulos de silicio monocristalino o silicio amorfo respectivamente. Por regla general los módulos serán de silicio monocristalino, por lo que ese factor será del 90%.

- La potencia pico del módulo en condiciones STC ($P_{MPP\ STC}$).
- La tensión en el punto de máxima potencia en condiciones STC ($V_{MPP\ STC}$)

Con todas estas premisas las expresiones necesarias para dimensionar el generador fotovoltaico son:

- ✓ El número total de módulos fotovoltaicos que se deben instalar se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 49. Número Total de Paneles dimensionados para el sistema fotovoltaico.

$$N_T = \frac{L_{mdc}}{P_{MPP\ STC} * G_d * P_G}$$

De la Ecuación 46 se definen las variables:

L_{mdc} : Consumo medio diario mensual para el mes crítico (Wh / día)

$P_{PMPP\ STC}$: Potencia Pico del módulo en condiciones STC ($W_p/kW / m^2$)
 Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomo G_d : Radiación solar global a la inclinación del sistema (indicado en kWh / m^2). También indica las HSP)
 P_G ; PR: Factor Global de funcionamiento del generador (suele variar entre 0.65 y 0.9)

Este número de módulos será un número no entero (en la mayoría de los casos), por lo que el resultado inicial que se dé se deberá redondear al entero superior.

Conociendo el número de total de paneles que forman el generador fotovoltaico y la tensión nominal de la batería, que coincide con la tensión nominal de la instalación, se puede determinar si es necesario agrupar los módulos en serie y en paralelo.

- ✓ El número de módulos que habrá que conectar en serie, se calcula así:

Ecuación 50. Numero de Módulos en Serie.

$$N_s = \frac{V_{BAT}}{V_{MPP\ STC}}$$

De la ecuación anterior las variables corresponden a:

N_s : número de módulos en serie por rama

V_{BAT} : tensión nominal de la batería (V)

$V_{MPP\ STC}$: tensión nominal del módulo en el punto de máxima potencia (V) en condiciones STC.

De nuevo, como el resultado no será entero se deberá redondear al entero superior.

- ✓ El número de ramas en paralelo a conectar para suministrar la potencia necesaria, viene dado por:

Ecuación 51. Número de Paneles en Paralelo.

$$N_p = \frac{N_T}{N_s}$$

Siendo N_p el número de módulos a conectar en ramas paralelo. En este caso también se habrá de redondear al entero superior.

3.3.2.5.2 Método ‘Amperios-hora’

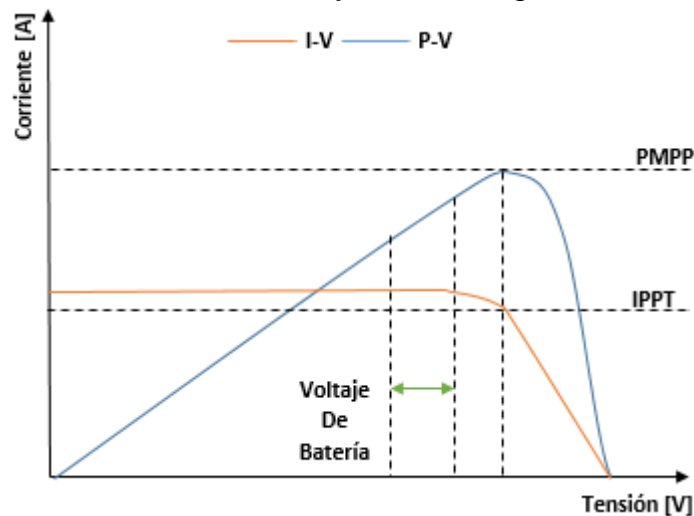
Como ya se ha indicado, en un sistema fotovoltaico autónomo, el módulo o generador fotovoltaico se utiliza generalmente para cargar una batería o banco de baterías. Si no existe seguidor del punto de máxima potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracker) el generador fotovoltaico proporciona potencia a una tensión cercana a la tensión de la batería, V_{BAT} .

Por lo que es de esperar una reducción de la misma con respecto a la potencia en el punto de máxima potencia. A fines prácticos, y considerando que no existe seguidor del punto de máxima potencia, el módulo o generador fotovoltaico opera en la región lineal de su característica V-I proporcionando una corriente muy próxima a la corriente en el punto de máxima potencia, I_{MPP} , (Ilustración 69). Por tanto, la potencia que ofrece el mismo se puede expresar como:

Ecuación 52. Potencia de Un Módulo Generador Fotovoltaico.

$$P_{GVF} = I_{MPP} * V_{BAT}$$

Ilustración 75. Característica V-I y P-V de un generador fotovoltaico



Fuente: Propia

Tal y como se aprecia en la figura 6, en los SFA sin MPPT no tiene sentido trabajar con la potencia pico del GFV, ya que al estar la tensión de trabajo impuesta por la batería, rara vez se alcanza este valor. En este caso, será más útil, tal y como refleja esta misma figura, operar con la corriente en el punto de

máxima potencia. Aunque puede que la corriente de cortocircuito sea más representativa de los valores de corriente comprendidos en el intervalo de tensiones en los que suele operar la batería, se suele escoger la primera siguiendo criterios especialmente conservadores.

No obstante, el método anterior basado en la potencia pico del GFV se puede utilizar en el dimensionado de GFV en SFA sin MPPT, pero habrá que incluir en el PR las pérdidas por no trabajar en el punto de máxima potencia, que dependen mucho de las condiciones de trabajo del GFV como pueden ser la irradiancia y la temperatura ambiente y que en algunos casos pueden alcanzar valores bastante elevados (en torno a un 25%)

Este segundo método se denomina “Amperios-Hora” puesto que se calculan inicialmente el equivalente en amperios-hora del consumo estimado, para, a partir de este valor, determinar la corriente a la que habrá de funcionar el generador. Conocida la corriente del generador se estará en disposición de conocer el número de paneles que se habrán de instalar en paralelo.

Posteriormente, se calculará el número de paneles a conectar en serie en cada rama anterior y así, el número total de los mismos. Para este método las suposiciones que se suelen hacer son las siguientes:

Los módulos fotovoltaicos, en este caso, **no** van a estar trabajando en el punto de máxima potencia de la curva V-I, sino en un punto de dicha curva cuya tensión sea la impuesta por la batería.

Será necesario tener como dato del módulo fotovoltaico lo siguiente:

- ✓ La corriente nominal $I_{MOD\ MPP\ STC}$ que como se ha indicado anteriormente se podrá aproximar a la corriente en el punto de máxima potencia en STC del módulo.

Con todas estas premisas las expresiones necesarias para dimensionar el generador fotovoltaico, para este segundo método son:

Ecuación 53. Consumo diario medio en periodo mensual de potencia en Amperios por hora.

$$Q_{AH} = \frac{L_{md}}{V_{BAT}}$$

Siendo:

Q_{Ah} : Consumo diario medio mensual en Amperios Hora al día (Ah/día)

L_{md} : Consumo diario medio mensual en Watios Hora al día (Wh/día)

V_{BAT} : tensión nominal de la batería (V)

Ecuación 54. Corriente total del generador en pico máximo de potencia.

$$I_{GVF} = \frac{Q_{AH}}{G_d}$$

Donde:

$I_{GVF \text{ MPP STC}}$: Corriente total del generador fotovoltaico en el punto de máxima potencia en STC(A)

Q_{Ah} : Consumo medio anual en Amperios-Hora al día (Ah/día)

G_d : Radiación solar global a la inclinación del sistema (kWh /m² o HSP)

Conocidos estos parámetros, el número de ramas en paralelo a conectar será:

Ecuación 55. Número de Módulos a Conectar en Paralelo.

$$N_P = \frac{I_{GVF \text{ MPP STC}}}{I_{MOD \text{ MPP STC}}}$$

El número de módulos que habrá que conectar en serie, se calcula así:

Ecuación 56. Número de Módulos a Conectar en Serie

$$N_S = \frac{V_{BAT}}{V_{MOD \text{ MPP}}}$$

Y por último, el número total de módulos será:

Ecuación 57. Número Total de Paneles del Sistema FV.

$$N_T = N_P * N_S$$

Los valores de N_T , N_s y N_p se redondean al entero superior, como se mencionó anteriormente.

Para el cálculo de la total del generador fotovoltaico, $I_{\text{GEN MPP STC}}$ se procederá de la siguiente forma en el caso de que se siga el criterio del mes peor: En primer lugar se habrá de disponer de una tabla con los valores de la **radiación solar global** recibida en cada mes (generalmente medida en kWh/m² ó en Horas Solares Pico, HSP) y para diferentes inclinaciones.

Tabla 27. Ejemplo Radiación Global media Mensual.

Mes	G _d Global diaria media mensual (kWh/m ² ó HPS)						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	1,385	1,514	1,584	1,625	1,636	1,617	1,569
Feb	2,036	2,139	2,176	2,176	2,139	2,066	1,960
Mar	3,062	3,104	3,078	3,004	2,882	2,718	2,516
Abr	4,040	4,041	3,970	3,837	3,647	3,405	3,119
May	4,121	4,109	4,024	3,872	3,658	3,387	3,069
Jun	4,743	4,702	4,587	4,399	4,143	3,828	3,464
Jul	4,558	4,526	4,421	4,244	4,002	3,701	3,352
Ago	4,071	4,075	4,005	3,870	3,674	3,423	3,126
Sep	3,571	3,584	3,530	3,421	3,260	3,053	2,806
Oct	2,374	2,467	2,492	2,474	2,415	2,316	2,180
Nov	1,624	1,744	1,803	1,829	1,823	1,785	1,716
Dic	1,205	1,342	1,422	1,476	1,501	1,499	1,467

En segundo lugar, sobre la tabla anterior se calculará el cociente Consumo medio diario mensual (que en nuestro caso es equivalente al Consumo medio diario) y Radiación Solar Global, es decir, se dividirá cada celda de la tabla anterior por el consumo medio diario en cada mes. Si se supone un consumo diario medio mensual constante durante todo el año igual a 3000 Wh /día, y se parte de una tensión nominal del sistema de 12 V, el consumo expresado en Ah vendrá dado por 250 Ah/día. En este caso, la matriz L_{md}/G_d quedaría como:

Tabla 28. Corriente que debe suministrar el GFV en el punto de máxima potencia para cada inclinación

Mes	L _{md} / G _d						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	180.51	165.13	157.83	153.85	152.81	154.61	159.34
Feb	122.79	116.88	114.89	114.89	116.88	121.01	127.55
Mar	81.65	80.54	81.22	83.22	86.75	91.98	99.36
Abr	61.88	61.87	62.97	65.16	68.55	73.42	80.15
May	60.66	60.84	62.13	64.57	68.34	73.81	81.46
Jun	52.71	53.17	54.50	56.83	60.34	65.31	72.17

Jul	54.85	55.24	56.55	58.91	62.47	67.55	74.58
Ago	61.41	61.35	62.42	64.60	68.05	73.04	79.97
Sep	70.01	69.75	70.82	73.08	76.69	81.89	89.09
Oct	105.31	101.34	100.32	101.05	103.52	107.94	114.68
Nov	153.94	143.35	138.66	136.69	137.14	140.06	145.69
Dic	207.47	186.29	175.81	169.38	166.56	166.78	170.42

A continuación se han de hacer los dos siguientes cálculos:

- ✓ Paso 1. Para cada inclinación se tomará el *Máximo* cociente, obteniendo de este modo el *Mes Crítico* para cada inclinación.
- ✓ Paso 2. Se elige de todos los máximos anteriores el *Menor*, de forma que se maximice la captación energética solar en el *Mes Crítico*.

En el ejemplo que estamos mostrando quedaría así (se indican en **negrita** para cada columna el valor máximo, y posteriormente en **negrita y cursiva** y, con un recuadro más grueso se indica el menor de todos esos máximos):

Tabla 29. Valor óptimo de Corriente que debe suministrar el GFV en el punto de máxima potencia para cada inclinación.

Mes	Lmd / Gd						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	180.51	165.13	157.83	153.85	152.81	154.61	159.34
Feb	122.79	116.88	114.89	114.89	116.88	121.01	127.55
Mar	81.65	80.54	81.22	83.22	86.75	91.98	99.36
Abr	61.88	61.87	62.97	65.16	68.55	73.42	80.15
May	60.66	60.84	62.13	64.57	68.34	73.81	81.46
Jun	52.71	53.17	54.50	56.83	60.34	65.31	72.17
Jul	54.85	55.24	56.55	58.91	62.47	67.55	74.58
Ago	61.41	61.35	62.42	64.60	68.05	73.04	79.97
Sep	70.01	69.75	70.82	73.08	76.69	81.89	89.09
Oct	105.31	101.34	100.32	101.05	103.52	107.94	114.68
Nov	153.94	143.35	138.66	136.69	137.14	140.06	145.69
Dic	207.47	186.29	175.81	169.38	166.56	166.78	170.42

Por tanto, en este caso la inclinación óptima a la que habría que situar los módulos sería de 40°, mientras que la corriente en el punto de máxima potencia del GFV deberá ser de 166.6 A. En el caso de que se hubiera seguido el criterio de máxima captación anual, entonces:

Tabla 30. Radiación Global Media.

Media Anual	G _d Global (kWh/m ²)						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	3.066	3.112	3.091	3.019	2.898	2.733	2.529

Tabla 31. Relación Consumo-Radiación.

Media Anual	L _{ma} / G _d						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
	81.58	80.33	80.92	82.83	86.25	91.50	98.83

Siguiendo con este caso, la inclinación óptima ahora sería de 10° y el tamaño del GFV de 80.33 A.

3.3.2.6 Dimensionado del Sistema de Acumulación (Batería)

Para definir el tamaño del acumulador, se deberán tener en cuenta los siguientes parámetros:

3.3.2.6.1 Profundidad de Descarga Máxima:

Es el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes de la desconexión del regulador, para proteger la duración de la misma. Se pueden definir dos profundidades de descarga atendiendo a dos ciclos que pueden tener las baterías.

De una parte está el denominado *ciclo diario*. Durante el ciclo diario la batería tendrá una determinada descarga, que posteriormente, si el sistema recibe suficiente radiación solar, permitirá cargarse. Las profundidades de descarga máximas que se suelen considerar en el ciclo diario, lo que se denominará *profundidad de descarga máxima diaria* ($P_{Dmax\ d}$) están en torno al 15 y el 20%.

Por otro lado, existe otro ciclo que es el denominado *ciclo estacional*. Este ciclo está relacionado con el máximo número de días que podrá una batería estar descargándose, sin recibir posteriormente una carga, es decir, el número de días que el sistema ha de estar funcionando autónomamente sin recibir radiación solar suficiente para cargar las baterías (días nublados). En baterías estacionarias de plomo-ácido un valor adecuado de este parámetro es del 70 %, parámetro que se denominará *profundidad de descarga máxima estacional* ($P_{Dmax\ e}$) (Estos parámetros se emplean en tanto por uno).

3.3.2.6.2 Días de Autonomía:

Es el número de días consecutivos que en ausencia de sol, el sistema de acumulación es capaz de atender el consumo, sin sobrepasar la profundidad de descarga máxima *estacional* de la batería. Los días de autonomía posibles, dependen entre otros factores del tipo de instalación y, sobre todo, de las condiciones climáticas del lugar.

La capacidad de las baterías es la cantidad de energía que debe ser capaz de almacenar la batería, para asegurar un correcto funcionamiento del sistema. Se pueden definir dos tipos de capacidades, según las profundidades de descarga máximas anteriormente definidas. Habrá una *capacidad de la batería diaria* (relacionada con el ciclo *diario* y la profundidad de descarga máxima *diaria*) y una *capacidad de la batería estacional* (relacionada con el ciclo *estacional* y la profundidad de descarga máxima *estacional*).

Las expresiones que se utilizan para hallar las capacidades de la misma, tanto en Wh (vatios hora) como en Ah (amperios hora) son (en el caso de que se utilice el criterio de máxima captación energética anual):

Ecuación 58. Capacidad Nominal Diaria de la Batería.

$$C_{nd}(Wh) = \frac{L_{ma}}{P_{Dmax\ d} * F_{CT}} * C_{nd}(Ah) \rightarrow C_{nd}(Wh)/V_{BAT}$$

Ecuación 59. Capacidad Nominal Estacionaria de la Batería.

$$C_{ne}(Wh) = \frac{L_{ma} * N}{P_{Dmax\ e} * F_{CT}} * C_{ne}(Ah) \rightarrow C_{ne}(Wh)/V_{BAT}$$

Siendo las variables correspondientes de las ecuaciones anteriores:

C_{nd} : capacidad nominal diaria de la batería (Wh ó Ah)

C_{ne} : capacidad nominal estacional de la batería (Wh ó Ah)

L_{ma} : Consumo diario medio anual (Wh /día)

$P_{Dmax\ d}$: Profundidad de descarga máxima diaria de la batería (tanto por uno)

$P_{Dmax\ e}$: Profundidad de descarga máxima estacional de la batería (tanto por uno)

V_{BAT} : tensión nominal de la batería (V)

F_{CT} : Factor de corrección por temperatura.

Si el criterio utilizado fuera el del mes crítico se sustituiría L_{ma} por L_{md} .

Una vez conocidas ambas capacidades, la que resulte mayor será la elegida en el dimensionado. La batería real (proporcionada por el fabricante) se elegirá de forma que se aproxime al valor de capacidad nominal calculado. Igualmente se tenderá a elegir la batería redondeando el valor de C_{nd} , o C_{ne} , según corresponda, por exceso para obtener mejor margen de seguridad. Es importante señalar que los periodos de autonomía cortos, alargan la vida de las baterías y dan al sistema mayor fiabilidad.

3.3.2.7 Dimensionado del Regulador

El regulador es el elemento que controla las cargas y descargas de la batería, permitiendo el proceso de carga de la misma desde el generador fotovoltaico y el proceso de descarga a través de los elementos de consumo eléctrico del sistema global. A la hora de dimensionar un regulador, el objetivo principal es obtener la corriente máxima que va a circular por la instalación. Por lo tanto, se habrá de calcular la corriente que produce el generador, la corriente que consume la carga, y la máxima de estas dos corrientes será la que deba soportar el regulador en funcionamiento.

La corriente de corte a la que debe actuar el regulador será fijada en el propio dispositivo, pero ha de soportar la máxima posible que la instalación pueda producir. La máxima intensidad de corriente que puede producir el generador es la corriente de cortocircuito del generador:

Ecuación 60. Ecuación 60. Corriente de entrada.

$$I_{entrada} = I_{GFV SC} = 1.25 * (I_{MOD SC} * N_p)$$

Siendo:

$I_{GFV SC}$: Corriente de cortocircuito del generador (A)

$I_{MOD SC}$: Corriente de cortocircuito del módulo(A)

N_p : Número de ramas en paralelo del generador

En la expresión anterior es recomendable incluir un factor de seguridad de 1,25 para considerar los aumentos de irradiancia que a veces se producen en los días nublados durante pequeños intervalos de tiempo.

La intensidad que consume la carga se determina teniendo en cuenta la corriente máxima de la carga (también denominada corriente de salida:

Ecuación 61. Corriente de salida.

$$I_{salida} = I_C = 1.25 * (P_{DC} + P_{AC}/\eta_{INV})/V_{BAT}$$

Donde:

I_C : Corriente que consume la carga (A)

P_{DC} : Potencia de las cargas en DC (W)

V_{Bat} : Tensión nominal de la batería (V)

P_{AC} : Potencia de las cargas en AC (W)

η_{INV} : Rendimiento del inversor

De estas dos corrientes, la máxima de ambas será la que el regulador deberá soportar, y será la que se utilice para su elección.

Ecuación 62. Corriente del Regulador.

$$I_R = \text{máx.}(I_{GFV, SC} * I_C)$$

3.3.2.8 Dimensionado del Inversor

Las características de funcionamiento que definen un inversor o convertidor DC – AC son:

- ✓ Potencia Nominal (kW)
- ✓ Tensión Nominal de Entrada (V)
- ✓ Tensión Nominal de Salida (V)
- ✓ Frecuencia de operación (Hz)
- ✓ Rendimiento (%)

La tensión de entrada en el inversor de una instalación fotovoltaica no será siempre constante, por lo que el inversor debe ser capaz de transformar distintas tensiones continuas dentro de un determinado rango. Ese rango suele ser de un 15 %. El valor de la tensión nominal es un dato de referencia dentro del intervalo de actuación que sirve para identificar el tipo de convertidor.

A la hora de dimensionar el inversor se tendrá en cuenta la potencia que demanda la carga AC, de forma que se elegirá un inversor cuya potencia nominal sea un 20% superior a la demandada por la carga. Esta última se considera como la suma de potencia de todos los equipos que van a funcionar simultáneamente. Se debe evitar el sobredimensionamiento del inversor para tratar de hacerlo trabajar en la zona donde presenta mejores eficiencias. Se puede resumir la potencia del inversor con esta expresión:

Ecuación 63. Potencia del Inversor

$$P_{inv} \approx 1.2 * P_{AC}$$

3.3.2.9 Dimensionado del Cableado

El dimensionado del cableado constituye una de las tareas en las que se deberá prestar especial atención, ya que siempre que exista consumo habrá pérdidas debido a las caídas de tensión en los cables.

Estas pérdidas óhmicas deben cumplir la más restrictiva de las dos condiciones siguientes:

1. Verificar las normas electrotécnicas de baja tensión
2. La caída de tensión debe ser menor que una cantidad prefijada.

Según el Pliego de Condiciones Técnicas de instalaciones aisladas de red, los conductores de la parte CC deberán tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior, incluyendo cualquier terminal intermedio, a los valores especificados a continuación:

- Generador Fotovoltaico y regulador inversor: 3%
- Regulador y batería: 1%
- Inversor y batería: 1%
- Regulador e inversor: 1%
- Inversor/regulador y cargas: 3%.

Su valor puede calcularse con las siguientes expresiones:

Ecuación 64. Sección Transversal del Conductor

$$S(mm^2) = (2 \cdot L \cdot I \cdot \rho) / (AV \cdot V)$$

Siendo:

V = Tensión nominal del sistema (V)

I = Corriente que circula por los conductores (A)

AV (%) = caída de tensión en los conductores

ρ = Resistividad del conductor ($\Omega \cdot mm^2 / m$)

L = Longitud de los conductores (m)

S = Sección de los conductores (mm^2)

3.3.3 Practica Aplicativa

Para el desarrollo de esta práctica se aplica todos los conceptos y procedimientos establecidos. Se diseñara en base al dimensionamiento aplicado un sistema fotovoltaico en una ubicación geográfica determinada de la región Colombiana.

Las cargas a manejar para este proyecto serán reales, como por ejemplo la de una vivienda en la ubicación especificada.

Se debe cumplir el procedimiento:

Paso 1. Estimación de radiación solar global sobre superficies inclinadas.

Paso 2. Estimación del consumo

Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico

Paso 4. Dimensionado del sistema de acumulación

Paso 5. Dimensionado del regulador

Paso 6. Dimensionado del inversor

Paso 7. Dimensionado del cableado

3.3.4 Análisis de resultados y conclusiones

Se requiere la evaluación y comprobación del uso de cada una de las formulas con el cual se realizan los cálculos y verificar que los resultados obtenidos son datos reales.



3.4 EJEMPLOS APLICADOS

A continuación se presentan dos ejemplos en los que se aplican los tres métodos de dimensionado, según los dos criterios de dimensionado y para dos casos: uno consumo constante a lo largo del año y otro con consumo variable. Las características de los doce ejemplos se resumen en esta tabla:

Tabla 32. Tabla Ejemplos

Ejemplo	Método	Criterio	Consumo	Localidad
1-A	Potencia Máxima	Mes Crítico	Constante	Santander
1-B	Amperios Hora	Mes Crítico	Constante	Santander

3.4.1 EJEMPLO 1-A.

Dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo, *siguiendo el criterio de mes crítico y el método de la potencia pico*, con las siguientes características:

- Perfil de consumo Constante Anual
- Ubicación: Santander.
- Equipos en continua (DC):

Tabla 33. Equipos DC Ejemplo 1-A

Descripción del equipo	Potencia(W)	Número de equipos	Horas/día Función
Iluminación habitaciones	20	4	2
Iluminación salón	40	2	4
Iluminación Cocina	40	1	3
Iluminación Cuartos de baño	30	2	2
Iluminación Exterior Vivienda	40	2	2
Teléfono	20	1	5
Motor de extracción de agua	743	1	0,7

- Equipos en alterna (AC):

Tabla 34. Equipos AC Ejemplo 1-A

Descripción del equipo	Potencia (W)	Número de equipos	Horas/día Función
Lavadora	380	1	0,5

Vídeo	30	1	5
Televisor color	100	1	2
Radiocasete	5	1	2
Frigorífico	90	1	3
Congelador	110	1	4
Ordenador	80	1	3

3.4.1.1 Paso 1. Estimación de consumos

Los consumos en continua son los siguientes:

Tabla 35. Estimación de Consumos DC Ejemplo 1-A

Descripción del equipo	Potencia (W)	Número de equipos	Horas/día Función	Consumo (Wh/día)
Iluminación habitaciones	20	4	2	160
Iluminación salón	40	2	4	320
Iluminación Cocina	40	1	3	120
Iluminación Cuartos de baño	30	2	2	120
Iluminación Exterior Vivienda	40	2	2	160
Teléfono	20	1	5	100
Motor de extracción de agua	743	1	0,7	520,1
Consumo Total DC			1.500 Wh/día	

Consumos en alterna son los siguientes:

Tabla 36. Estimación de Consumos AC Ejemplo 1-A

Descripción del equipo	Potencia (W)	Número de equipos	Horas/día Función	Consumo (Wh/día)
Lavadora	380	1	0,5	190
Vídeo	30	1	5	150
Televisor color	100	1	2	200
Radiocasete	5	1	2	10
Frigorífico	90	1	3	270
Congelador	110	1	4	440
Ordenador	80	1	3	240
Consumo Total DC			1.500 Wh/día	

Es decir:

$$L_{DC} = 1500Wh/dia * L_{AC} = 1500Wh/dia$$

Recordamos que las eficiencias de la batería y del inversor influyen en el cálculo de la energía total necesaria. Si se tiene en cuenta el esquema básico de un SFVA con cargas DC y AC como el que se muestra a continuación, se puede comprobar como la eficiencia del inversor solamente afecta al consumo AC. Por tanto, el consumo medio diario esta dado en la siguiente ecuación:

$$L_{md} = \frac{L_{md\ DC} + \frac{L_{md\ AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{BAT} * \eta_{CON}} \rightarrow L_{md} = 3333\ Wh / día$$

El consumo total anual y el consumo medio anual son:

$$L_T = L_{md} * 365\ días = 1216545\ Wh$$

$$L_{ma} = \frac{L_T}{365} = 3333\ Wh / día$$

(Coinciden L_{ma} y L_{md} , en este caso puesto que el consumo es constante a lo largo del año e igual para cada día).

Este último consumo expresado en Ah será:

$$Q_{Ah} = \frac{L_{ma}}{V_{BAT}} = 3333 \frac{Wh}{24V} = 139\ Ah / día$$

3.4.1.2 Paso 2. Cálculo de la inclinación óptima de los módulos

En la siguiente tabla se muestran los valores de radiación solar global en Santander:

Tabla 37. Radiación Global Ejemplo 1-A

Mes	Gd Global (kWh/m2 / día)						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	1.399	1.529	1.600	1.641	1.652	1.633	1.585

Feb	2.056	2.160	2.198	2.198	2.160	2.087	1.980
Mar	3.093	3.135	3.109	3.034	2.911	2.745	2.541
Abr	4.080	4.081	4.010	3.875	3.683	3.439	3.150
May	4.162	4.150	4.064	3.911	3.695	3.421	3.100
Jun	4.790	4.749	4.633	4.443	4.184	3.866	3.499
Jul	4.604	4.571	4.465	4.286	4.042	3.738	3.386
Ago	4.112	4.116	4.045	3.909	3.711	3.457	3.157
Sep	3.607	3.620	3.565	3.455	3.293	3.084	2.834
Oct	2.398	2.492	2.517	2.499	2.439	2.339	2.202
Nov	1.640	1.761	1.821	1.847	1.841	1.803	1.733
Dic	1.217	1.355	1.436	1.491	1.516	1.514	1.482

Según el criterio del Mes Crítico que es el que se está empleando requiere, una vez conocido el consumo, se ha de preparar a partir de la tabla de radiaciones, la tabla de cocientes Consumo / Radiación que es la que se muestra a continuación:

Tabla 38. Relación Radiación-Consumo Ejemplo 1-A.

Mes	L _{md} / G _d						
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Ene	2383	2180	2084	2031	2018	2041	2104
Feb	1621	1543	1517	1517	1543	1598	1684
Mar	1078	1063	1072	1099	1145	1214	1312
Abr	817	817	831	860	905	969	1058
May	801	803	820	853	902	975	1076
Jun	696	702	720	750	797	862	953
Jul	724	729	747	778	825	892	985
Ago	811	810	824	853	898	964	1056
Sep	924	921	935	965	1013	1081	1176
Oct	1390	1338	1325	1334	1367	1425	1514
Nov	2033	1893	1831	1805	1811	1849	1924
Dic	2739	2460	2321	2236	2199	2202	2250

Para cada inclinación se busca el mayor valor de todos los cocientes de cada columna. Se han señalado con la celda sombreada. Como se puede comprobar, puesto que en este caso el consumo es constante, esos valores coinciden con el mes de diciembre, que es cuando hay menos radiación solar. Una vez que se conocen esos valores se elige a continuación el menor de todos ellos que en este caso corresponde al valor de 2199 y 40 ° de inclinación (señalado en negrita y recuadro doble).

Resultado:

Inclinación de los módulos = 40 °, Radiación global = 1,516 kWh /m² /día.

3.4.1.3 Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico

El número total de módulos a emplear está dado por la ecuación:

Ecuación 65. Número Total de Módulos Ejemplo 1-A.

$$N_T = L_{md} / (P_{MPP, STC} \cdot G_d \cdot P_G)$$

Con un factor global de funcionamiento de módulo de 0.90, entonces:

$$N_T = 3333 / (110 \cdot 1,516 \cdot 0.90) = 22.21 \text{ módulos.}$$

En principio se emplearían 23 módulos. (Este número puede cambiar). Respecto al número de ellos en serie y en paralelo sería:

$$N_s = V_{BAT} / V_{MOD, MPP} = 24 / 17.4 = 1.38 \approx 2 \text{ módulos en serie}$$

$$N_p = N_T / N_s = 23 / 2 = 11.50 \approx 12 \text{ módulos en paralelo}$$

Módulos a Conectar:

Estructura 12 x 2 módulos (paralelo x serie) (24 módulos en total)

3.4.1.4 Paso 4. Dimensionado de la batería

Recordamos que los dos parámetros importantes para el dimensionado de la batería son la máxima profundidad de descarga (estacional y diaria) y el número de días de autonomía. En este caso estos valores son:

$$P_{Dmax, e} = 0.7; N = 6; P_{Dmax, d} = 0.15$$

Por lo tanto la capacidad nominal de la batería será:

$$C_{nd} (Wh) = L_{md} / (P_{Dmax, d} \cdot F_{CT}) = 3333 / 0.15 \cdot 1 = 22220 Wh$$

$$C_{nd} (Ah) = C_{nd} (Wh) / V_{BAT} = 33340 / 24 = 926 Ah$$

$$C_{ne} (Wh) = (L_{md} \cdot N) / (P_{Dmax, e} \cdot F_{CT}) = 3333 \cdot 6 / 0.7 \cdot 1 = 28569 Wh$$

$$C_{ne} (Ah) = C_{ne} (Wh) / V_{BAT} = 28569 / 24 = 1191 Ah$$

Cómo se ha de elegir el mayor valor, el resultado es:

$$C_n = 1191 Ah$$

3.4.1.5 Paso 5. Dimensionado del regulador

Se calcula la corriente de entrada al regulador, que es el producto de la corriente de trabajo de un módulo multiplicada por el número de ramas en paralelo:

$$I_{entrada} = I_{GFV, SC} = 1.25 \cdot (I_{MOD, SC} \cdot N)_p = 1.25 \cdot 6.1 \cdot 12 = 91.5 \text{ A}$$

Y por otro lado la corriente de salida, con la expresión:

$$I_{salida} = I_C = 1.25 \cdot (P_{DC} + P_{AC} / \eta_{INV}) / V_{BAT} = 103.5 \text{ A}$$

De estas dos corrientes, la máxima de ambas será la que el regulador deberá soportar, y será la que se utilice para su elección.

$$\text{En este caso, } I_{Regulador} > 103.5 \text{ A}$$

3.4.1.6 Paso 6. Dimensionado del inversor

La Potencia AC de todos los elementos que funcionan en alterna es de 795 W. Todos estos elementos no estarán funcionando a la vez, por lo que multiplicando por un factor de funcionamiento del 75 % proporcionaría una potencia alterna de 596 W. Se deberá instalar por tanto un inversor que tenga una potencia entorno a los **720W** ($P_{inv} \approx 1.2 \cdot P_{AC}$).

3.4.2 EJEMPLO 1-B.

Dimensionar un sistema fotovoltaico autónomo, *siguiendo el criterio de mes crítico y el método de amperios-hora*, con las siguientes características:

3.4.2.1 Paso 1. Estimación de consumos

Se resumen los resultados importantes de este paso:

$$L_{ma} = L_T / 365 = 3333 \text{ Wh} / \text{día} = L_{md}$$
$$Q_{Ah} = L_{ma} / V_{BAT} = 3333 / 24 = 139 \text{ Ah} / \text{día}$$

3.4.2.2 Paso 2. Cálculo de la inclinación óptima de los módulos

Se resumen los resultados importantes de este paso:

$$\text{Inclinación de los módulos } 40^\circ. G_d = 1.516 \text{ kWh} / \text{m}^2 / \text{día}$$

3.4.2.3 Paso 3. Dimensionado del generador fotovoltaico

La corriente máxima del generador será:

$$I_{GFV\ MPP\ STC} = Q_{Ah} / G_d = 139 / 1.516 = 91.69\ A$$

El número de ramas en paralelo a conectar será:

$$N_p = I_{GFV\ MPP\ STC} / I_{MOD\ MPP\ STC} = 91.69 / 6.1 = 15.03 \\ \approx 16\ \text{módulos en paralelo}$$

El número de módulos que habrá que conectar en serie, se calcula así:

$$N_s = V_{BAT} / V_{MOD\ MPP} = 24 / 17.4 = 2\ \text{módulos en serie por cada rama.}$$

Y por último, el número total de módulos será:

$$N_T = N_p \cdot N_s = 16 \cdot 2 = 32\ \text{módulos en total}$$

Módulos a Conectar:

Estructura 16 x 2 módulos (paralelo x serie) (32 módulos en total)

3.4.2.4 Paso 4. Dimensionado de la Batería

Recordamos que los dos parámetros importantes para el dimensionado de la batería son la máxima profundidad de descarga (estacional y diaria) y el número de días de autonomía. En este caso estos valores son:

$$P_{Dmax\ e} = 0.7; N = 6; P_{Dmax\ d} = 0.15.$$

Por lo tanto la capacidad nominal de la batería será:

$$C_{nd}\ (Wh) = L_{md} / (P_{Dmax\ d} \cdot F_{CT}) = 3333 / 0.15 \cdot 1 = 22220\ Wh \\ C_{nd}\ (Ah) = C_{nd}\ (Wh) / V_{BAT} = 33340 / 24 = 926\ Ah \\ C_{ne}\ (Wh) = (L_{md} \cdot N) / (P_{Dmax\ e} \cdot F_{CT}) = 3333 \cdot 6 / 0.7 \cdot 1 = 28569\ Wh \\ C_{ne}\ (Ah) = C_{ne}\ (Wh) / V_{BAT} = 28569 / 24 = 1191\ Ah$$

Cómo se ha de elegir el mayor valor, el resultado es: $C_n = 1191\ Ah$

3.4.2.5 Paso 5. Dimensionado del regulador

Se calcula la corriente de entrada al regulador, que es el producto de la corriente de trabajo de un módulo multiplicada por el número de ramas en paralelo:

$$I_{entrada} = I_{GFV\ SC} = 1.25 \cdot (I_{MOD\ SC} \cdot N)_p = 1.25 \cdot 6.1 \cdot 16 = 122\ A$$

Y por otro lado la corriente de salida, con la expresión:

$$I_{salida} = I_C = 1.25 \cdot (P_{DC} + P_{AC} / \eta_{INV}) / V_{BAT} = 103.5\ A$$

De estas dos corrientes, la máxima de ambas será la que el regulador deberá soportar, y será la que se utilice para su elección.

$$\text{En este caso, } I_{\text{Regulador}} > 122 \text{ A}$$

3.4.2.6 Paso 6. Dimensionado del inversor

La Potencia AC de todos los elementos que funcionan en alterna es de 795 W. Todos estos elementos no estarán funcionando a la vez, por lo que multiplicando por un factor de funcionamiento del 75 % proporcionaría una potencia alterna de 596 W. Se deberá instalar por tanto un inversor que tenga una potencia entorno a los **720W**.

3.4.2.7 Cálculo de la Sección Transversal del Conductor

Para determinar en forma aproximada la sección del conductor requerida, se puede hacer uso de la siguiente fórmula:

Ecuación 66 Sección Transversal del Conductor Ejemplo 1-B.

$$S = \frac{(L * I * 0,04)}{(V/20)}$$

Donde:

L = Longitud del conductor en metros

I = Corriente en Amperes

V = Voltaje del Sistema [Ejemplo 12V, 24V, 48V]

S = Sección transversal del conductor en mm²

Por ejemplo para un conductor con longitud de 22m, que alimenta una carga DC de 175W a 12V. La corriente nominal es:

$$I = \frac{175}{12} = 14,58 \text{ A}$$

La Sección requerida para el conductor es:

$$S = \frac{(L * I * 0,04)}{(V/20)} = \frac{(22 * 14,58 * 0,04)}{(12/20)} = 21,38 \text{ mm}^2$$

Tabla 39. Tabla para convertir el área o sección transversal a la designación AWG.

Sección Transversal [mm²]	Cable AWG	Diámetro [in]	Diámetro [mm]
107,16	0000	0,4600	11,68
84,97	000	0,4096	10,40
67,40	00	0,3648	9,27
53,46	0	0,3249	8,25
42,39	1	0,2893	7,35
33,61	2	0,2576	6,54
26,65	3	0,2294	5,83
21,14	4	0,2043	5,19
16,76	5	0,1819	4,62
13,29	6	0,1620	4,11
10,55	7	0,1144	3,67
8,36	8	0,1285	3,26
6,63	9	0,1143	2,91
5,26	10	0,1285	2,59
4,17	11	0,1019	2,30
3,31	12	0,0907	2,05
2,63	13	0,0808	1,83
2,08	14	0,0720	1,63
1,65	15	0,0641	1,45
1,31	16	0,0508	1,29
1,04	17	0,0453	1,15
0,82	18	0,0403	1,02
0,65	19	0,0359	0,91
0,52	20	0,0320	0,81
0,41	21	0,0285	0,72
0,33	22	0,0254	0,65
0,26	23	0,0226	0,57
0,20	24	0,0201	0,51
0,16	25	0,0179	0,45
0,13	26	0,0159	0,40

Fuente: NTC 2050, Capítulo 3 310-17. (22)

3.5 VEHÍCULO SOLAR

3.5.1 Introducción

En las últimas dos décadas se han generado mayores demandas de energía, y contemporáneo a este suceso también problemas ecoambientales en el planeta que han aparecido en paralelo a una disminución de las fuentes de combustibles fósiles. La ingeniería ha volcado la atención hacia las opciones de energías renovables, alternativas y la atención en explotar con seriedad los recursos de la Tierra. Una de estas alternativas se da con gran fuerza en el campo automovilístico, la cual comenzó en 1980 cuando los Australianos Hans Tholstrup y Larry Perkins, construyeron el primer automóvil impulsado por energía solar. En la actualidad el desarrollo de esta tecnología se ve implementado en Carreras de autos de alta velocidad y a nivel comercial se ve estimado un futuro donde la gran población de automóviles sea híbridos eléctricos o de generación fotovoltaica. En la siguiente experiencia, el aprovechamiento de la energía suministrada por una célula solar se aplicará para alimentar un prototipo de vehículo impulsado por un pequeño motor eléctrico. Se debe tener en cuenta que el diseño del vehículo de impulsión por motor eléctrico a pequeña escala que sea alimentado por medio de una célula solar debe ser capaz de colocarse en marcha una vez sea expuesto al sol.

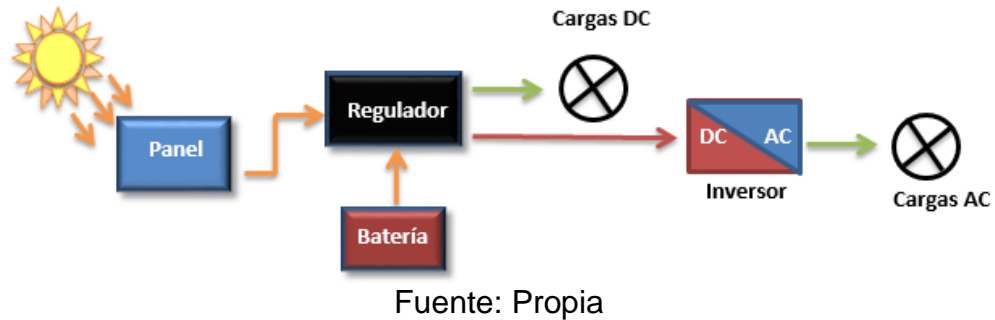
3.5.2 Marco Teórico

3.5.2.1 Sistema Fotovoltaico

Este concepto es la base de la experiencia, por eso tal como se explicó en el capítulo de Sistemas Eléctricos Fotovoltáicos, se debe tener claro que un sistema fotovoltaico es un conjunto de elementos encargados de aprovechar la energía producida por el sol y la convierten en energía eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos se basan en la capacidad de las celdas fotovoltaicas de transformar energía solar en energía eléctrica (DC). En un sistema interconectado a la red eléctrica esta energía, mediante el uso de un inversor, es transformada a corriente alterna (AC), la cual puede ser utilizada en hogares e industrias.

La generación de energía eléctrica dependerá de las horas que el sol irradie sobre el panel solar y del tipo y cantidad de módulos instalados, orientación, inclinación, la irradiancia sobre éstos, la calidad de la instalación [Equipos de tecnología fotovoltaica] y la potencia nominal.

Ilustración 76. Esquema Base de un Sistema Fotovoltaico



3.5.2.2 Segunda Ley de Newton

La Segunda Ley de Newton establece que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa. De esta forma podemos relacionar la fuerza y la masa de un objeto con la siguiente ecuación:

Ecuación 67. Segunda Ley de Newton.

$$F = m * a \quad (23)$$

El vehículo debe ser lo más ligero posible, si no se frenaría demasiado. Se tiene en cuenta para esto que la aceleración es inversamente proporcional a la masa.

3.5.2.3 Potencia Eléctrica

La potencia eléctrica es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio [W].

El impulso proporcionado al está relacionado con la potencia del motor. Las células fotovoltaicas convierten la radiación solar en la máxima corriente eléctrica que alimenta el motor. La siguiente es la ecuación que define la fuerza de impulso:

Ecuación 68. Fuerza de Impulso del motor.

$$Fm = \frac{P}{v} \quad (23)$$

De la ecuación 68, se definen las siguientes variables:

F_m : impulso del motor a través de las ruedas motrices (N)

P : potencia proporcionada por el motor (W)

V : velocidad de desplazamiento del coche (m/s)

La fuerza de movimiento del vehículo es proporcional a la potencia suministrada por el motor.

3.5.3 Desarrollo Experimental

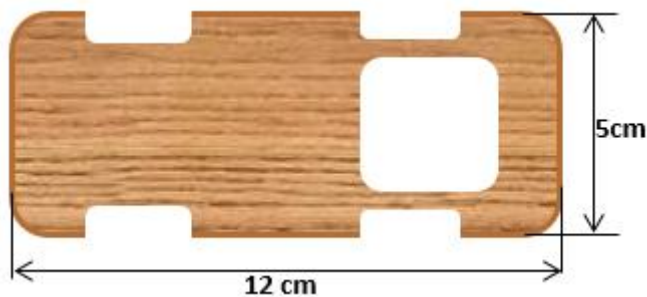
Se realiza el diseño esquemático del vehículo a construir, en el cual se tienen en cuenta las siguientes especificaciones:

1. El diseño debe permitir que la totalidad del panel quede expuesta a los rayos solares para aprovechamiento máximo de generación del panel.
2. La estructura general de todo el vehículo debe ser ligera, suficientemente liviana para mejorar el desplazamiento de este mismo.
3. El vehículo debe tener un sistema de acumulación de energía, por lo que debe ser incluido a la conexión un Condensador.

Los Materiales utilizados para el montaje de la estructura del vehículo son los siguientes:

- Estructura Base de Madera Triple. Esta cumple la función de Carrocería Pedestal del Vehículo.
-
-

Ilustración 77. Estructura Base.

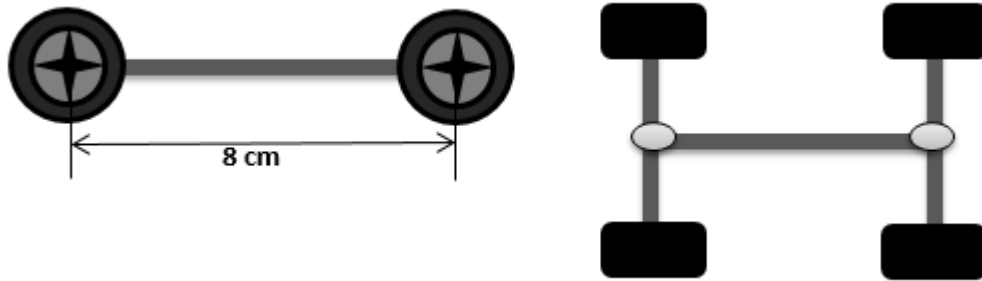


Fuente: Propia.

- Chasis del Vehículo. Este Chasis fue tomado de un automóvil de juguete puesto que tenía las dimensiones buen giro en sus ruedas y un peso ligero, apropiados para el diseño requerido.

-

Ilustración 78. Chasis.



Fuente: Propia.

- Pieza de Cristal Acrílico. Esta es la Base del panel Solar hacia la estructura de madera de triple. Consta de un Área de 8cm de longitud y 4mm de Espesor. Se ligara a la base con Pegamento.

-

-

Ilustración 79. Base de Panel Solar.



- Motor de Corriente Directa DC de 2 Voltios. Este se energiza por medio del abasto de electricidad suministrada por el panel Solar.

Ilustración 80. Motor Eléctrico.



- Condensador que funciona como acumulador de energía y que a su vez también cumple función de estabilizador. Del condensador se tienen los datos nominales de 1500 μF y capacidad de 6.3 voltios.

Ilustración 81. Condensador de 1500 micro Faradios.



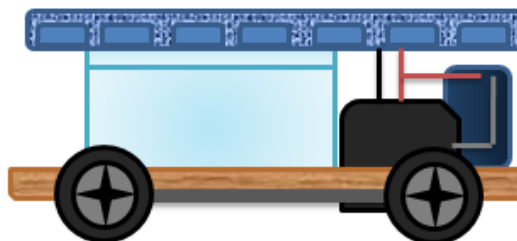
- Panel Solar. Se Utilizó un panel solar ETM de 2 voltios de generación y de corriente directa DC nominal de 300 mA. Su conexión al motor es de tipo serie.
-
-

Ilustración 82. Célula Solar Fotovoltaica.



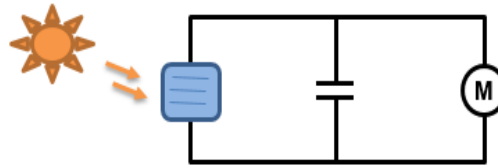
Se realiza el ensamblaje de los materiales, construyéndose la estructura del prototipo. El siguiente es un esquema en vista de perfil del pretendiente diseño del ensamble del vehículo:

Ilustración 83. Prototipo de Vehículo solar.



Esquema de Conexión. Los componentes (Célula Fotovoltaica, condensador y motor) están conectados en paralelo, como lo se aprecia en la siguiente figura:

Ilustración 84. Esquema de Conexión.



3.5.4 Resultados

Contestar las siguientes preguntas con base a los resultados obtenidos:

1. ¿El vehículo opera de forma adecuada, su desplazamiento es a una velocidad satisfactoria?
2. ¿El vehículo tiene una captación inmediata, que tan sensible es a la radiación solar la célula fotovoltaica?
3. ¿La energía acumulada en el condensador produce que el vehículo continúa circulando en una zona de sombra?
4. Describir las mediciones caracterizadas al vehículo y sus componentes.

8 CONCLUSIONES

De acuerdo a la investigación realizada se concluye y constituye la Guía Teórico.-Práctica de Energía solar Fotovoltaica diseñada para el laboratorio de fuentes Renovables de la universidad de la Costa.

Establece las pautas necesarias de acuerdo a la revisión bibliográfica establecida adaptándolas a los recursos con que cuenta el laboratorio de fuente renovable de la universidad de la costa.

Contiene los fundamentos básicos de la conversión de energía fotovoltaica, lo cual complementara directamente las asignaturas relacionadas a este tema.

Instruye y proporciona métodos para el desarrollo de sistemas fotovoltaicos y sirve para complemento de material de investigación.

9 BIBLIOGRAFÍA

1. CANARIAS, GOBIERNO. Guia tecnica de aplicacion intalaciones de energia renovables. *AGENERGIA.ORG*. [En línea] 2014. http://www.agenergia.org/files/resourcesmodule/@random49914e4ed9045/1234263307_GuiaFotovoltaicaGobCan.pdf.
2. U-TALCA. Energia Sustentable - Chile. *Universidad de Talca chile*. [En línea] <http://www.energiasustentable.cl/wp-content/uploads/2012/11/guiapv2.pdf>.
3. U-AGUADILLA. Universidad de puerto de Rico de Aguadilla. *Universidad de puerto de Rico de Aguadilla*. [En línea] <http://www.uprag.edu/index.php/practicass-de-laboratorio-electronica/101-departamentos/electronica>.
4. CVNE. Centro virtual de Noticas de la Educacion - CVNE. *Univercidad Autonoma de Occidente*. [En línea] 30 de 10 de 2008. <http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-174956.html>.
5. UNINORTE. prensa y noticias Universidad del Norte. [En línea] 11 de febrero de 2014. <http://www.uninorte.edu.co/web/grupo-prensa/noticia?articleId=1465808&groupId=73923>.
6. http://es.mashpedia.com/energ%C3%ADa_solar. Mashpedia Encyclopedia. [En línea]
7. MicroRespuestas.com. Micro Respuestas. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2014.] <http://microrespuestas.com/cuando-se-producen-los-solsticios>.
8. http://es.mashpedia.com/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica. Mashpedia Encyclopedia. [En línea]
9. EROSKI - Energía Solar. consumer.es. [En línea] [Citado el: 4 de Julio de 2014.]
10. UPME. *Guia de Especificaciones de Sistemas Fotovoltaicos*. 2003. Vols. ANC-603-12.
11. Harper, Enríquez. *El ABC de las Instalaciones Eléctricas en Sistemas Eolicos y Fotovoltaicos*. Mexico D.F. : LIMUSA, 2012.
12. Barrera, Magíster Marcela P. *Simulación y Caracterización de Celdas solares multijuntura y de silicio cristalino para aplicaciones espaciales*. epública Argentina : s.n., 2009.

13. CURSOLAR. [En línea]
http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04.htm.

14. SOLARSOSTENIBLE.ORG. Energía Solar y Desarrollo Sostenible. [En línea]
 Solarsostenible, 9 de Noviembre de 2012. [Citado el: 13 de Junio de 2014.]
<http://www.solarsostenible.org/>.

15. Abella, Miguel Alonso. *Master en Energías Renovables y Mercadeo, Energía Solar Fotovoltaica, Escuela de Organización Industrial*.

16. Mex., Corner. Cornermex. [En línea] 2011.
<http://www.conermex.com.mx/informacion-de-interes/los-sistemas-fotovoltaicos.html>.

17. McGraw Hill. Unidad 1. Componentes de una Instalación Solar Fotovoltaica.
 s.l. : McGraw Hill.

18. UPME. Atlas Colombiano de Radiacion Solar. [En línea]
<http://www.si3ea.gov.co/si3ea/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/en-US/Default.aspx>.

19. Ingenieria Libre. Ingelibre. *Ingelibreblog.wordpress*. [En línea]
<https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/01/18/calculo-de-la-distancia-minima-entre-placas-solares/>.

20. Spencer, J. W. Representation of the Position of the Sun. [aut. libro] Fourier Series. Search 2(5), 172p, 1971.

21. Manualparedes. Manual de Diseño Para Edificaciones. [En línea]
www.fau.ucv.ve/racionalidad/Paginas/manual.html.

22. NTC 2050. *Normas Tecnicas Colombianas*. Capitulo 3 310-17.

23. Serway, Raymond A. *Física Para Ciencias e Ingenierías Volumen I*. s.l. : John W. Jewett Jr. Thomson. Sexta Edición .

24. http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/4-Mapas_Radiacion.
 UPME - Unidad de Planeación Minero Energética. [En línea]

25. Panel Solar Fotovoltaico. [En línea]
<http://eliseosebastian.tumblr.com/post/27900695685/componentes-de-un-panel-solar-fotovoltaico>.

26. Web De Las Energías Renovables. www.lawebdelasenergiasrenovables.com. [En línea] [Citado el: 7 de julio de 2014.] <http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/esquema-de-instalacion-de-paneles-solares-termicos-y-fotovoltaicos/>.
27. Teknosolar. www.teknosolar.com. [En línea] <http://www.teknosolar.com/blog/interconexion-de-paneles-solares/>.
28. Teknosolar . [En línea] Teknosolar , 15 de Octubre de 2013. [Citado el: 6 de Junio de 2014.] <http://www.teknosolar.com/blog/interconexion-de-paneles-solares/>.
29. *Renewables Global Status Report*. REN21. (REN21) , 2010, Renewable Energy Policy Network for the 21st century, Vol. Paris, págs. pp. 1–80.

**CARTA DE ENTREGA Y AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES PARA LA
CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN
ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS Y TRABAJOS DE
GRADO**

Barranquilla, 06 de abril del 2015.

Marque con una X

Tesis ☐ Trabajo de Grado ☒

Yo Ronald Alberto Ospino Gómez, identificado con C.C. No. 72,004,882 y Jesus David Ariza Rodríguez, actuando en nombres propios y como autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado GUÍA TEÓRICA PRACTICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA presentado y aprobado en el año 2015 como requisito para optar al título de Ingeniero Eléctrico; hago entrega del ejemplar respectivo y de sus respectivos anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizo a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

EL AUTOR–ESTUDIANTES, manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizó sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación

o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, EL ESTUDIANTE – AUTOR, asumirá toda la responsabilidad, y saldrá en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 06 días del mes de Abril de Dos Mil Quince 2015.

EL AUTOR – ESTUDIANTES. _____
FIRMA

EL AUTOR – ESTUDIANTES. _____
FIRMA

FORMULARIO DE LA DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO:

GUÍA TEÓRICA PRACTICA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

SUBTÍTULO, SI LO TIENE:

AUTOR AUTORES

Apellidos Completos	Nombre Completos
Ospino Gómez	Ronald Alberto

Apellidos Completos	Nombre Completos
Jesús David	Ariza Rodríguez

DIRECTOR (ES)

Apellidos Completos	Nombre Completos
Ospino Castro	Adalberto

JURADO (S)

Apellidos Completos	Nombre Completos
Hernández Herrera	Hernán
Silva Ortega	Jorge Iván

ASESOR (ES) O CODIRECTOR

Apellidos Completos	Nombre Completos
Balbis Morejón	Milen

TRABAJO PARA OPTAR AL TITULO DE: Ingeniero Eléctrico.

FACULTAD: Ingeniería.

PROGRAMA: Pregrado X Especialización __

NORMBRE DEL PROGRAMA: Ingeniería Eléctrica.